

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**Інженерно-фізичний факультет**  
**Кафедра фізики металів**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Є.В. Іващенко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 132 Матеріалознавство**

**на тему: «Дифузійні процеси і структурно-фазові перетворення при  
низькотемпературній термічній обробці плівкових композицій  
Pt/Fe/Au/Pt/Fe»**

Виконав:

студент II курсу, групи ФМ-81мп

Гаврилюк Вадим Вікторович \_\_\_\_\_

Керівник:

Доцент КФМ, к.т.н.

Владимирський І.А. \_\_\_\_\_

Консультант з розроблення стартап-проекту:

Доцент, к.е.н.

Петренко К.В. \_\_\_\_\_

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях:

Професор, д.т.н.

Левченко О.Г. \_\_\_\_\_

Консультант з нормоконтролю:

Асистент

Шаповалова Н.А. \_\_\_\_\_

Рецензент:

с.н.с. ФТІМС НАН України, к.т.н.

Ворон М.М. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Інженерно-фізичний факультет**  
**Кафедра фізики металів**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 132 Матеріалознавство («Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Є.В. Іващенко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Гаврилюку Вадиму Вікторовичу**

1. Тема дисертації «Дифузійні процеси і структурно-фазові перетворення при низькотемпературній термічній обробці плівкових композицій Pt/Fe/Au/Pt/Fe», науковий керівник дисертації Владимирський Ігор Анатолійович, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «12» листопада 2019 р. № 3890-с
2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_
3. Об'єкт дослідження: плівкові композиції Pt/Fe/Au/Pt/Fe
4. Вихідні дані: літературні дані та результати особистих експериментів
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Дослідити закономірності дифузійного формування структури та фазового складу нанорозмірних плівкових композицій Pt/Fe/Au/Pt/Fe при низькотемпературній термічній обробці у вакуумі. 2. Зробити висновки на основі отриманих експериментальних даних.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: зображення мікроструктур, графіки, таблиці.
7. Орієнтовний перелік публікацій: тези: «Резистометричне дослідження фазових перетворень в нанорозмірних двошарових композиціях Pt/Fe» на XII Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 2019; «розрахунок об'ємних коефіцієнтів дифузії в системі Fe-Pt методом молекулярної динаміки» на XII Міжнародної конференції студентів, аспірантів

та молодих вчених, 2019;

## 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	Петренко К.В, доцент		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Левченко О.Г., професор		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Видача завдання		
2	Проведення та написання літературного огляду		
3	Освоєння методик дослідження		
4	Виконання експериментальних досліджень		
5	Отримання результатів		
6	Написання висновків		
7	Оформлення роботи		
8	Оформлення презентації та написання доповіді		
9	Попередній захист		
10	Захист на засіданні ЕК		

Студент

Гаврилюк В.В.

Науковий керівник дисертації

Владимирський І.А.

## РЕФЕРАТ

**Магістерська дисертація:** 85 сторінок, 29 рисунків, 12 таблиць, 50 літературних джерел.

ПЛІВКОВІ КОМПОЗИЦІЇ, ФАЗОВИЙ СКЛАД, СТРУКТУРА, FePt, Au, ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ.

**Об'єкт досліджень** – перебіг термічно-індукованих дифузійних процесів і структурно-фазових перетворень в нанорозмірних плівкових композиціях Pt/Fe/Au/Pt/Fe.

**Метою роботи** є дослідження закономірностей термічно-індукованого дифузійного формування структури та фазового складу плівкових композицій Pt/Fe/Au/Pt/Fe при низькотемпературних відпалах у вакуумі.

**Методи дослідження** – рентгеноструктурний фазовий аналіз, чотиризондовий метод вимірювання електричного опору, мес-спектрометрія вторинних нейтральних частинок, мас-спектрометрія вторинних іонів.

Досліджувані плівкові композиції отримано методом магнетронного осадження на підкладинки термічно окисненого монокристалічного Si(001) і піддано наступній низькотемпературній термічній обробці у вакуумі за різних фізико-технологічних параметрів. Плівкові матеріали після термічної обробки досліджено методами рентгеноструктурного фазового аналізу, *in-situ* резистометрії, мас-спектрометрії вторинних нейтральних частинок та мас-спектрометрії вторинних іонів.

Робота є актуальною оскільки плівкові матеріали на основі впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt можуть бути використані в якості носія магнітного запису з надвисокою щільністю. Введення Au в плівкові композиції на основі FePt може сприяти збільшенню коерцитивної сили фази  $L1_0$ -FePt за рахунок зменшення обмінної взаємодії між сусідніми феромагнітними зернами в результаті їх ізоляції немагнітним Au. Також введення додаткового шару Au може обумовлювати зміну температурних інтервалів структурно-фазових перетворень в досліджуваних плівкових композиціях. В той самий час, закономірності дифузійного формування фазового складу при відпалах плівкових композицій Pt/Fe з додатковими шарами легуючих елементів не можна вважати такими, що встановлені повною мірою.

## ABSTRACT

**Master thesis:** 85 pages, 29 figures, 12 tables, 50 references.

FILM COMPOSITIONS, PHASE COMPOSITION, STRUCTURE, FePt, Au,  
PHASE TRANSFORMATIONS

**The object of research:** the course of thermally induced diffusion processes and structural-phase transformations in nanoscale Pt/Fe/Au/Pt/Fe film compositions.

**The purpose of research:** study of the patterns of thermally induced diffusion formation of the structure and phase composition of the Pt/Fe/Au/Pt/Fe film compositions at low-temperature thermal treatment in vacuum.

**Research methods:** X-ray diffraction analysis, electrical resistivity measurements (four-probe method), secondary neutral mass spectrometry, secondary ion mass spectrometry.

The investigated film compositions were obtained by magnetron deposition on the substrates of thermally oxidized single crystalline Si(001) and subjected to subsequent low temperature thermal treatment in vacuum at various physico-technological parameters. After thermal treatment, the film materials were investigated by X-ray structural analysis, *in-situ* resistometry, secondary neutral mass spectrometry, and secondary ion mass spectrometry.

The work is relevant because materials based on the ordered phase of  $L1_0$ -FePt can be used as a high-density magnetic recording medium. The introduction of Au into FePt-based film compositions may contribute to the increase of the coercive force of the  $L1_0$ -FePt phase by reducing the exchange interaction between adjacent ferromagnetic grains as a result of their isolation by non-magnetic Au. Also, the introduction of an additional layer of Au may cause a change in the temperature intervals of the structural-phase transformations in the investigated film compositions. At the same time, the regularities of the diffusion formation of the phase composition upon annealing of Pt/Fe film compositions with additional layers of alloying elements cannot be considered as being fully established.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....	11
1.1 Плівкові композиції FePt з впорядкованою фазою $L1_0$ -FePt – перспективний матеріал для створення носіїв магнітного запису інформації.....	11
1.2 Вплив легування плівок FePt на їх структурно-фазові характеристики.	17
1.3 Вплив наявності Au в плівкових композиціях Pt/Fe на їх структурно- фазовий стан та магнітні властивості .....	21
1.4 Висновки до розділу 1.....	24
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	26
2.1 Магнетронне осадження .....	26
2.2 Фізико-технологічні параметри термічної обробки плівкових зразків ..	27
2.3 Рентгеноструктурний фазовий аналіз .....	28
2.4 Мас-спектрометрія вторинних нейтральних частинок .....	29
2.5 Чотиризондовий метод вимірювання питомого опору .....	30
2.6 Мас-спектрометрія вторинних іонів.....	32
2.7 Висновки до розділу 2.....	34
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА .....	35
3.1 Структурно-фазові характеристики плівкової композиції Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після осадження.....	35
3.2 Структурно-фазові характеристики плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалів з різною витримкою в температурному інтервалі 100 °C – 260 °C .....	38
3.3 Структурно-фазові характеристики плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалів за температури 200 °C з різною витримкою .....	48
3.4 Висновки до розділу 3.....	53
4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	54

4.1	Опис ідеї проекту.....	54
4.2	Розрахунок планової собівартості проведення дослідження.....	54
4.2.1	Визначення заробітної плати персоналу.....	55
4.2.2	Визначення розміру єдиного соціального внеску.....	57
4.2.3	Визначення вартості матеріалів.....	57
4.2.4	Визначення вартості спеціального обладнання і приладів.....	57
4.2.5	Визначення витрат на службові відрядження.....	57
4.2.6	Визначення вартості робіт і послуг сторонніх організацій.....	57
4.2.7	Визначення інших прямих неврахованих витрат.....	58
4.2.8	Визначення накладних витрат.....	58
4.2.9	Визначення планової кошторисної вартості науково-дослідної роботи.....	58
4.3	Висновки до розділу 4.....	64
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	66
5.1	Правові та організаційні основи охорони праці.....	66
5.2	Аналіз наявності шкідливих та небезпечних виробничих факторів.....	67
5.2.1	Аналіз параметрів приміщення та мікроклімату.....	67
5.2.2	Повітря робочої зони.....	68
5.2.3	Шум.....	69
5.2.4	Вібрації.....	70
5.2.5	Електробезпека.....	70
5.2.6	Виробниче випромінювання.....	71
5.3	Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці.....	72
5.3.1	Вимоги до організації робочого місця.....	72
5.3.2	Вентиляція.....	73
5.3.3	Аналіз освітлення приміщення.....	73
5.4	Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	73
5.4.1	Пожежна безпека.....	74
5.4.2	Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	75
5.5	Висновки до розділу 5.....	76

ВИСНОВКИ.....	77
CONCLUSIONS .....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	81



## ВСТУП

Підвищення щільності магнітного запису інформації залишається одним з актуальних завдань сучасного матеріалознавства. Список матеріалів, а також варіації сплавів, що можуть бути використані для вирішення даного завдання постійно поповнюється. Тим не менш, плівкові композиції на основі подвійної впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt в цьому відношенні розглядаються як один із перспективних матеріалів завдяки їх відмінним магнітним властивостям, а саме високим значенням коерцитивної сили та енергії магнітнокристалічної анізотропії.

При підвищенні щільності запису можна досягти збільшення об'єму інформації, що оброблюється та зберігається, при постійних розмірах носія. Швидкість запису, обробки і зчитування інформації також можна покращити, адже носій з підвищеною щільністю запису може забезпечити обробку того самого об'єму інформації за значно корочший час.

Одним з матеріалів, використання яких сприятиме вирішенню даних завдань є багат шарові плівкові композиції Pt/Fe/Au/Pt/Fe. Для досягнення бажаних магнітних властивостей цього плівкового матеріалу необхідне формування заданого структурно-фазового складу, що досягається шляхом проведення відповідної термічної обробки. Однак закономірності термічно-індукованого формування структури та фазового складу даних плівкових систем не можна вважати вивченими повною мірою. Тому метою даного дослідження є виявлення закономірностей термічно-індукованого дифузійного формування структури та фазового складу плівкових композицій Pt/Fe/Au/Pt/Fe при низькотемпературній термічній обробці у вакуумі.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні задачі дослідження:

- провести огляд сучасних літературних джерел з тематики дослідження;
- провести термічну обробку плівкових композицій FePt з додатковим проміжним шаром Au у вакуумі;

- виявити закономірності термічно-індукованих структурних та фазових змін в плівкових матеріалах.

Об'єкт дослідження – процеси формування структури та фазового складу нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt з додатковими шарами Au.

Предмет дослідження – структурно-фазові та фазово-концентраційні неоднорідності за товщиною плівкових композицій Pt/Fe/Au/Pt/Fe в процесі осадження та подальшої термічної обробки.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Плівкові композиції FePt з впорядкованою фазою $L1_0$ -FePt – перспективний матеріал для створення носіїв магнітного запису інформації

Враховуючи динаміку розвитку комп'ютерних технологій одним з актуальних завдань сучасного фізичного матеріалознавства є створення новітніх матеріалів для використання в якості носіїв магнітного запису інформації з підвищеною щільністю. Такі матеріали дозволять збільшити об'єм інформації, яку здатен зберігати носій, не збільшуючи при цьому його розмірів, а також підвищити ефективність та швидкість обробки більшої кількості інформації. Перспективним у цьому плані матеріалом вважаються плівкові композиції на основі FePt з впорядкованою подвійною фазою  $L1_0$ , що обумовлюється високими значеннями їх магнітокристалічної анізотропії та коерцитивної сили [1-3]. Велика кількість наукових груп у всьому світі займається дослідженням закономірностей формування і покращення властивостей даного класу матеріалів [4-10]. Так в роботі [11] автори запропонували метод отримання плівок FePt шляхом поєднання хімічного осадження та подальшого відпалу. Плівки Fe леговані Pt отримано на підкладинку  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  з додатково нанесеними шарами Pt(100 нм)/Ti(50 нм) за допомогою термічного осадження і піддали наступному відпалу за температур від 300 °C до 800 °C в захисній атмосфері 5 об.%  $\text{H}_2$ /95 об.%  $\text{N}_2$ . Плівки FePt отримано за рахунок дифузійного переміщення атомів Fe та Pt в процесі відпалу. За результатами рентгеноструктурного фазового аналізу виявлено, що кубічну фазу  $A1$ -FePt сформовано за температури 300 °C, а процес впорядкування з фазовою трансформацією  $A1 \rightarrow L1_0$  ініціалізовано за 400 °C. Плівкова композиція з впорядкованою фазою  $L1_0$ -FePt характеризується перпендикулярною магнітною анізотропією та коерцитивністю 729 кА/м після відпалу за температури 600 °C. Подальше підвищення температури відпалу призвело до зниження значення коерцитивності, ймовірно, через зростання зерна в результаті розвитку дифузійних процесів. Крім того, товщину плівки, легованої Pt, можна варіювати

від 150 нм до 700 нм, регулюючи кількість використовуваної поверхнево-активної речовини. SQUID-аналіз дозволив виявити, що Pt в якості легуючого елементу може сприяти суттєвому покращенню хімічної стійкості плівок Fe на повітрі.

В роботі [12] досліджено магнітні властивості та мікроструктуру тонких плівок FePt, отриманих методом імпульсного осадження на підкладинки SiO<sub>2</sub>/Si(100). У порівнянні з композиціями, отриманими методом звичайного осадження, дані плівки FePt характеризуються вищим значенням параметру впорядкування (0,6-0,8) після відпалу в температурному інтервалі 500 °C-700 °C. Крім того, за температури 700 °C спостерігається формування переважної орієнтації зерен в напрямку [001] з коефіцієнтом орієнтації Лотерінга ~ 0,96. Також досягається більш виражена перпендикулярна магнітна анізотропія за кімнатної температури з достатньо високою коерцитивністю при полі, перпендикулярному до площини плівки (9 кЕ). Аналіз мікроструктури засвідчив, що імпульсне осадження стимулює ріст зерна після відпалу, чим пояснюється більш високий параметр впорядкування. Також вважається, що формування текстури [001] може бути пов'язане з деформацією розтягу кристалічної структури. Більше того, багат шарові композиції, отримані методом імпульсного осадження, характеризуються нижчою температурою відпалу, необхідного для активації фазового перетворення  $A1 \rightarrow L1_0$  – 400 °C, що на 100 °C нижче, ніж у плівок, отриманих традиційним осадженням. Результати даного дослідження переконливо свідчать, що імпульсне осадження є ефективним методом формування перпендикулярної магнітної анізотропії плівок FePt та зниження температури досягнення впорядкованого стану кристалічної будови.

В роботі [13] досліджено магнітно-анізотропні плівкові композиції  $A1/L1_0$ -FePt, нанесені на аморфні скляні підкладинки, використовуючи поєднання методів електронної мікроскопії ультрависокої роздільної здатності та вимірювання магнітних властивостей. Плівку з вираженою текстурою  $L1_0$ -FePt [001] спочатку осаджено при відносно низькій температурі 352 °C на

проміжний шар  $\text{MgO/Cr}$ , що розташовувався між плівкою та підкладкою. Другий шар  $\text{FePt}$  отримано при постійному зниженні температури осадження до кінцевої величини (від  $242\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $92\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) залежно від товщини шару. Ця процедура призвела до утворення системи з градієнтним розподілом фазового складу, що поєднував магнітно-тверді і магнітно-м'які компоненти, розділені грубою нанометровою міжфазною межею. В даній плівковій системі магнітна анізотропія поступово змінюється за рахунок зміни відносної кількості магнітно-твердих і магнітно-м'яких фаз по всій товщині плівки. Електронно-мікроскопічний аналіз дозволив дослідити структуру зразків на атомному рівні. Фази  $A1$  і  $L1_0\text{-FePt}$  локалізовано всередині плівки та визначено орієнтаційні зв'язки між їх ґратками. Зразки з товщиною градієнтного шару ( $t_{\text{град.}}$ ) до  $15\text{ нм}$  характеризуються переважною перпендикулярною анізотропією. Також виявлено значне зменшення коерцитивної сили із збільшенням товщини магнітно-градієнтного шару ( $\sim 30\%$  при  $t_{\text{град.}} = 5\text{ нм}$ ), що свідчить про можливість їх потенційного застосування в якості матеріалів для виготовлення носіїв магнітного запису інформації.

В роботі [14] плівкові композиції  $\text{FePt}$  з впорядкованою структурою  $L1_0$  отримано методом магнетронного осадження за різних температур. Вивчалися кристалічна структура, процес впорядкування та магнітні властивості даних плівкових композицій. Часткове впорядкування структури плівкових композицій спостерігається за температури осадження  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Повністю впорядкований стан досягається за температури  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Зі збільшенням температури підкладки з  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  коерцитивність стрімко зростає від  $5,69\text{ кЕ}$  до  $16,3\text{ кЕ}$ , а магнітна анізотропія зростає з  $2,0 \times 10^7\text{ ерг/см}^3$  до  $4,5 \times 10^7\text{ ерг/см}^3$  (рис. 1.1). Структура поверхні плівки також змінюється залежно від температури осадження. Температурну залежність магнітних властивостей автори даної статті пов'язують зі зменшеними тетрагональними спотвореннями кристалічної структури за більш високої температури.

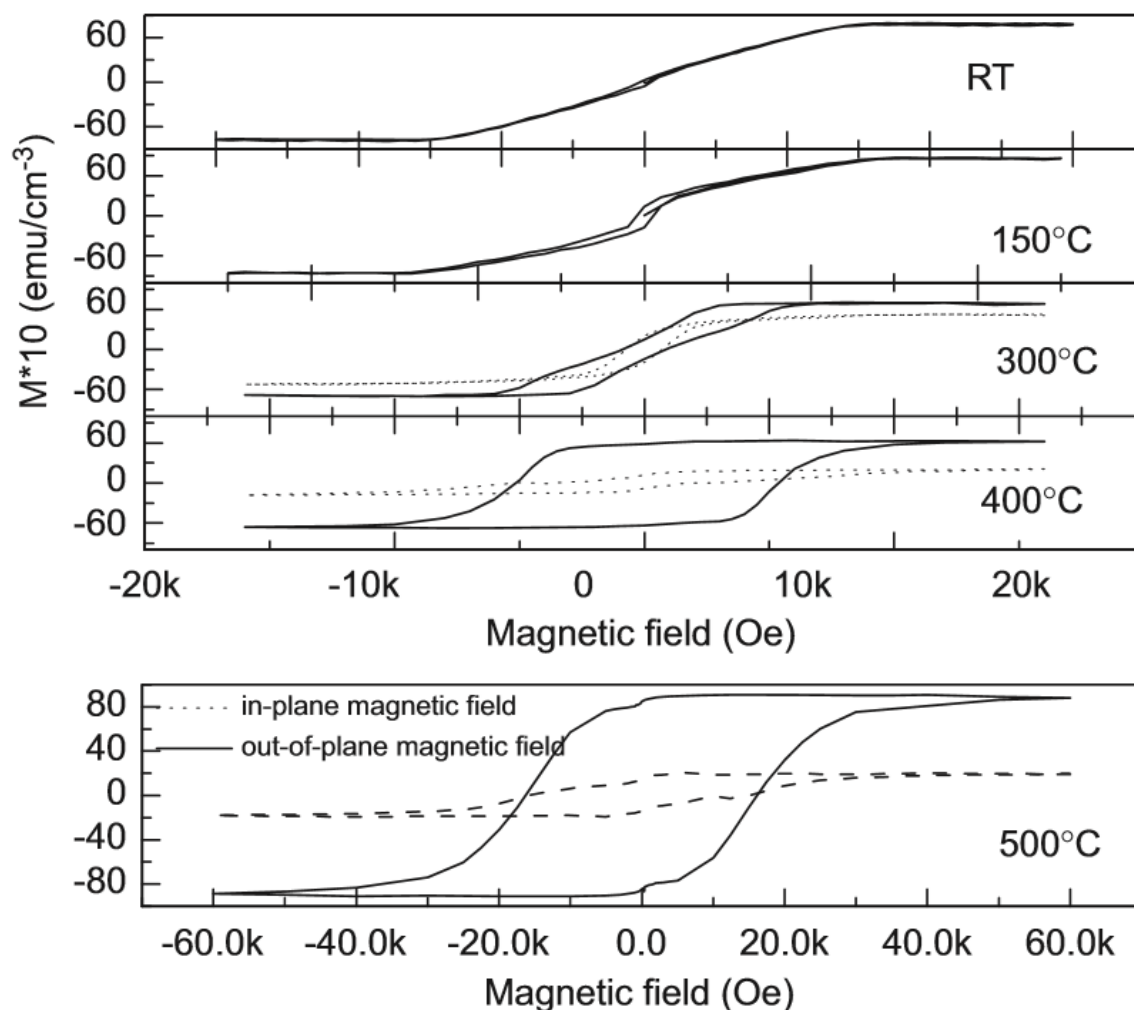


Рисунок 1.1 – Петлі гістерезису плівкових композицій FePt, осаджених на підкладинки LaAlO<sub>3</sub> за різних температур [14]

В роботі [15] досліджено вплив невідповідності параметрів ґратки плівки та підкладинки на мікроструктуру та магнітні властивості плівок FePt. Досліджувані плівкові композиції різної товщини (3 нм, 5 нм та 10 нм) отримано на чотирьох типових монокристалічних підкладинках (MgO, KTaO<sub>3</sub>, SrTiO<sub>3</sub> та LaAlO<sub>3</sub>). Результати дослідження методом рентгеноструктурного аналізу, а також растрової та трансмісійної електронної мікроскопії дозволили виявити, що невідповідність параметрів ґраток підкладинки та плівки обумовлює виникнення різних типів кристалографічних текстур та мікроструктур плівкових композицій FePt (рис. 1.2).

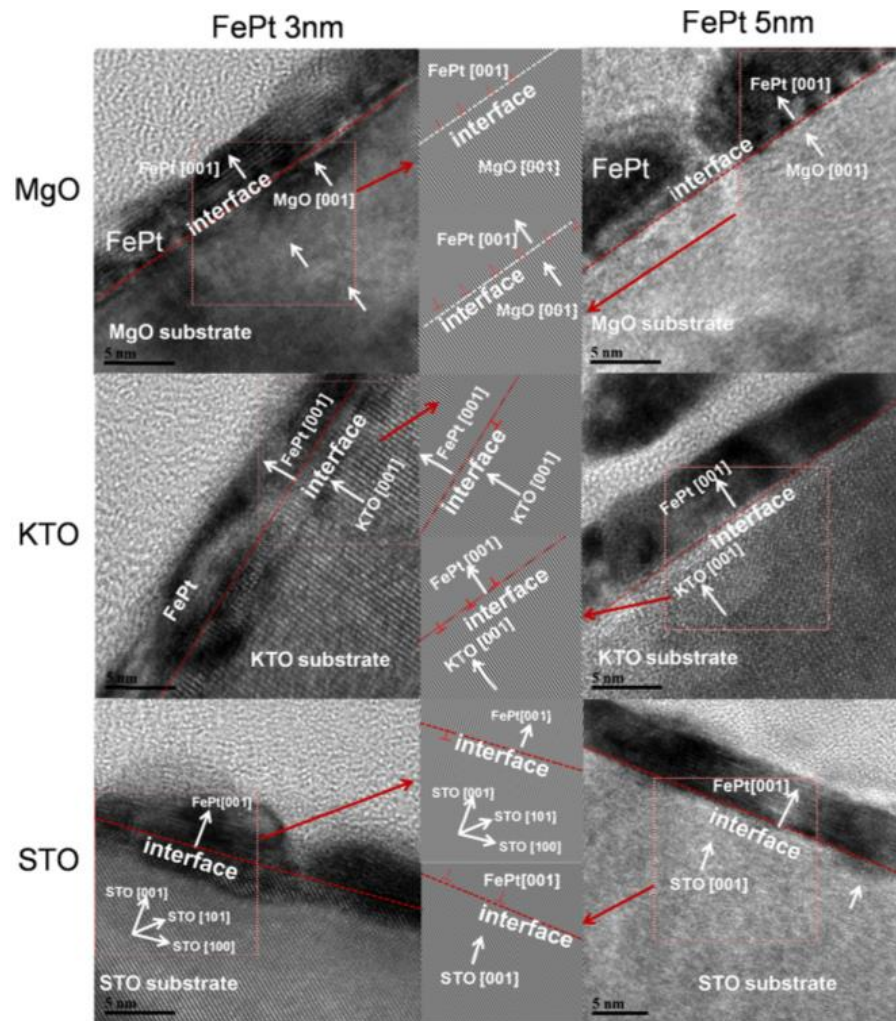


Рисунок 1.2 – Електронно-мікроскопічні зображення плівкових зразків FePt після осадження на різні підкладки [15]

Під дією деформації розтягу між плівкою FePt та підкладками (MgO, KTaO<sub>3</sub> та SrTiO<sub>3</sub>) у плівках FePt формується переважна текстура  $L1_0$ -FePt [001]. У плівкових композиціях FePt, вирощених на підкладці LaAlO<sub>3</sub>, формується переважна орієнтація зерен FePt [110]. Крім того, при тій самій товщині плівки FePt зі зменшенням невідповідності решітки в ряду від MgO до KTaO<sub>3</sub> та SrTiO<sub>3</sub> (напруження розтягу) морфологія плівок FePt змінювалась від лабіринтної до суцільної. Плівки FePt, вирощені на підкладці LaAlO<sub>3</sub> (напруження стиску), характеризувались острівковою структурою.

В роботі [16] досліджено вплив хімічного складу плівкових композицій FePt на процес формування подвійної впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt. Багатошарові плівки Fe/Pt з атомним співвідношенням Fe<sub>x</sub>Pt<sub>100-x</sub> ( $x = 36 - 58$ )

нанесено на кварцеві скляні підкладки за кімнатної температури за допомогою магнетронного осадження з подальшим відпалом за температур від 300 °С до 600 °С. Виявлені результати щодо сформованого структурно-фазового складу і досягнутих магнітних властивостей є суттєво різними для плівкових композицій, отриманих методами пошарового осадження і сумісного розпорошення. Коерцитивність плівкових зразків  $\text{Fe}_{48}\text{Pt}_{52}$  може досягати 4,1 кЕ після відпалу за температури 300 °С (рис. 1.3).

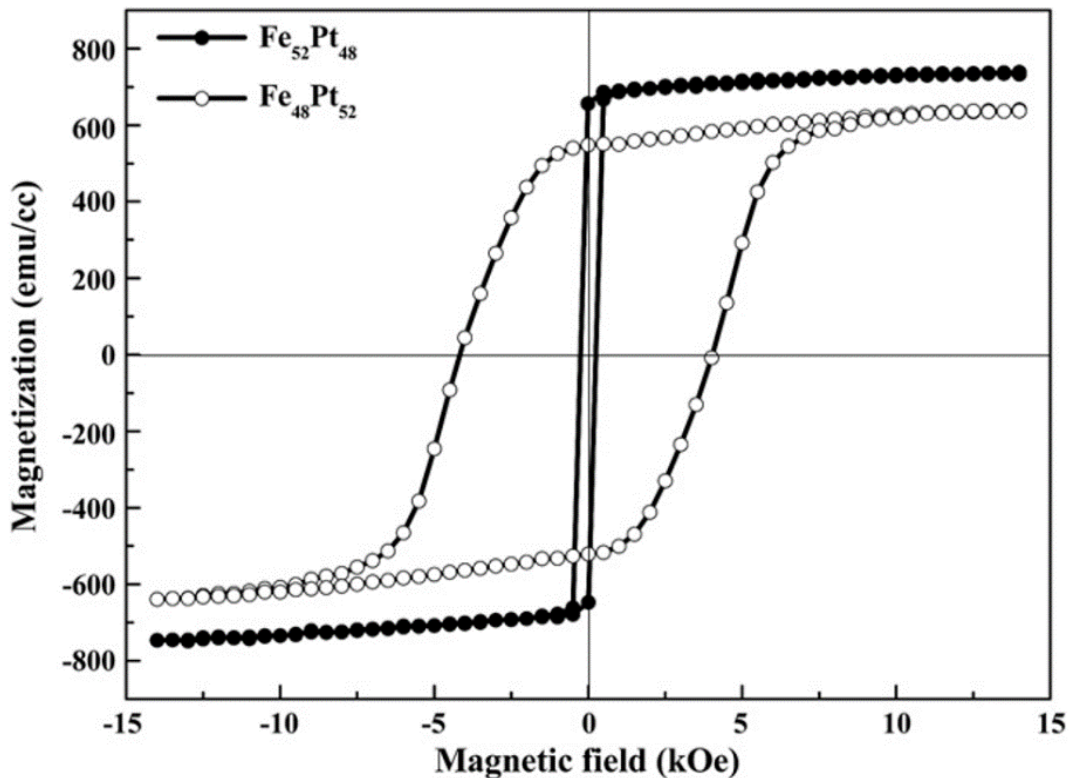


Рисунок 1.3 – Петлі гістерезису зразків  $\text{Fe}_{52}\text{Pt}_{48}$  та  $\text{Fe}_{48}\text{Pt}_{52}$  товщиною 60 нм після відпалу за температури 300 °С [16]

Також спостерігається суттєве прискорення процесу перебігу фазових перетворень для плівкових систем з нестехіометричним складом – переважним вмістом Pt ( $x = 40 - 50$ ). Прискорена дифузія атомів та процес впорядкування можуть бути пов'язані з розширенням кристалічної ґратки через надмірний вміст Pt.



## 1.2 Вплив легування плівок FePt на їх структурно-фазові характеристики

В роботі [17] досліджено вплив границі поділу між металевими шарами FePt та Mo на процес впорядкування в тонких плівках FePt/Mo та Mo/FePt/Mo. Шари Mo і FePt мали товщину 20 нм. Зразки осаджено на скляну підкладку за кімнатної температури з подальшим відпалом за температури 350 °C протягом 1 години. Дані рентгеноструктурного аналізу дозволили виявити, що одношаровий плівковий матеріал FePt має неупорядковану гранецентровану кубічну структуру. В той час як зразки Mo/FePt і Mo/FePt/Mo характеризуються гранецентрованою тетрагональною структурою, що притаманна впорядкованій фазі  $L1_0$ -FePt. Одношарова плівка FePt проявляє магнітно-м'які властивості, тоді як плівкові композиції з додатковим шаром Mo є магнітно-твердими з коерцитивною силою 4,7 кЕ та 7,0 кЕ, відповідно (рис. 1.4).

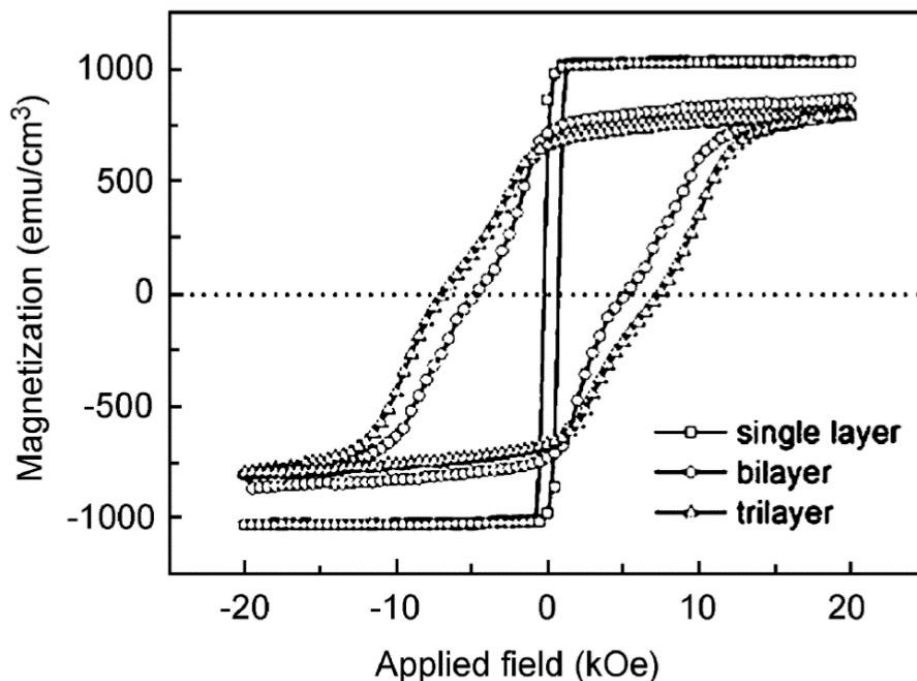


Рисунок 1.4 – Петлі гістерезису зразків FePt, Mo/FePt і Mo/FePt/Mo [17]

У роботі [18] досліджено перебіг твердотільних реакцій в плівкових композиціях Pt(15 нм)/Fe(15 нм) і Pt(15 нм)/Ag(10 нм)/Fe(15 нм) при відпалах за температур 320 °C і 340 °C з різною тривалістю. Пошарові хімічні розподіли та

структурно-фазовий склад плівкових зразків досліджено методами мас-спектрометрії вторинних нейтралей, електронної мікроскопії та рентгеноструктурного фазового аналізу. Показано, що в результаті відпалів при зазначених температурах, за яких дифузійні процеси відбуваються переважно за зернограничним механізмом, а дифузією за об'ємом зерен можна знехтувати, утворюються однорідні гомогенні шари FePt і FePt з приблизно 10 ат.% Ag, відповідно. Дослідження пошарових концентраційних розподілів переконливо свідчить, що основний механізм дифузійного фазоутворення в даному випадку ґрунтується на твердотільних реакціях, індукованих зернограничною дифузією. При таких реакціях кінцева фаза формується позаду границі зерна, що рухається в перпендикулярному до її вихідного положення напрямку. Також рентгеноструктурний аналіз дозволив виявити, що в структурі обох плівкових систем після низькотемпературної термічної обробки присутня впорядкована фаза  $L1_0$ -FePt, яка є перспективною для майбутнього створення магнітних носіїв інформації на її основі.

В роботі [19] досліджено вплив введення додаткових шарів MgO та Ag на магнітні властивості плівкових композицій на основі FePt. Показано, що плівки MgO(5 нм)/FePt( $t$  нм)/MgO(5 нм) (де  $t = 5$  нм, 10 нм і 20 нм) проявляють більш виражену магнітну анізотропію з розташуванням вісі легкого намагнічування паралельно площині плівки. В той самий час коерцитивність при полі, прикладеному паралельно площині плівки, і перпендикулярна магнітна анізотропія збільшуються при введенні додаткового шару Ag. Коерцитивність становить 3,1 кЕ для плівки MgO(5 нм)/FePt( $t$  нм)/MgO(5 нм) і збільшується до 4,8 кЕ при введенні шару Ag товщиною 5 нм (рис. 1.5). Аналіз за допомогою методів трансмісійної електронної мікроскопії та енерго-дисперсійного спектрального аналізу дозволив виявити, що Ag в основному розподіляється по границях зерен FePt, що приводить до збільшення їх енергії, що, в свою чергу, сприятиме посиленню коерцитивності та магнітної анізотропії.

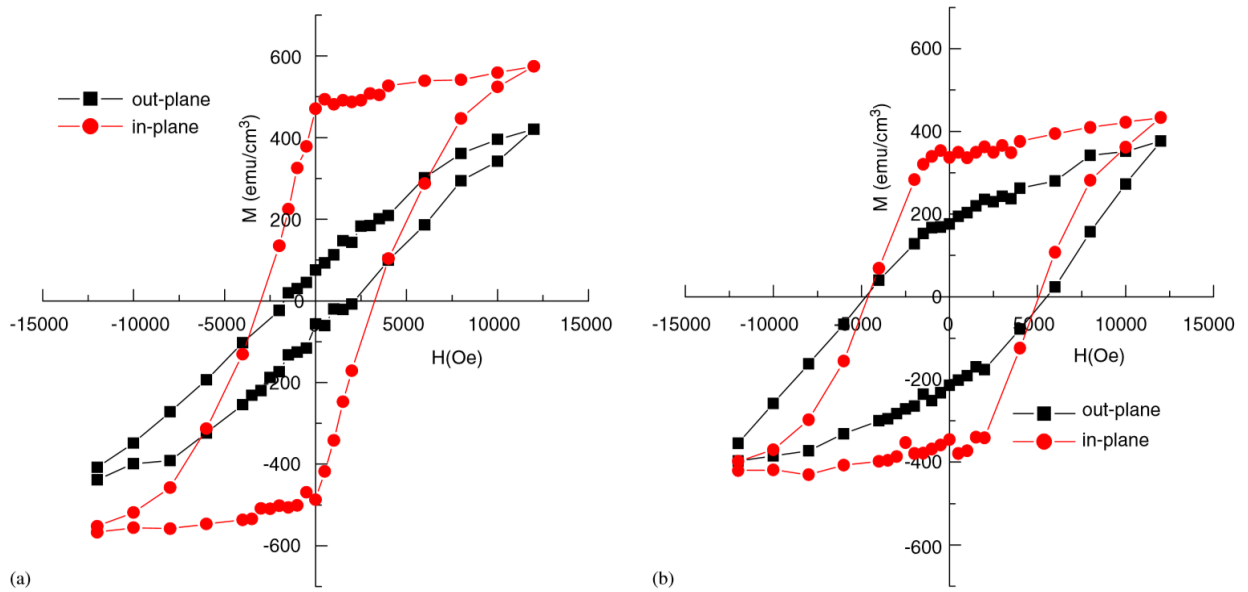


Рисунок 1.5 – Петлі гістерезису зразків MgO(5 нм)/FePt(10 нм)/MgO(5 нм) (а) та MgO(5 нм)/FePt(10 нм)/Au(5 нм) (б) [19]

В роботі [20] досліджено вплив введення проміжного шару Ag на процес формування впорядкованої фази  $L1_0$  в тонкоплівкових композиціях на основі FePt. Плівки Pt(15 нм)/Ag(x)/Fe(15 нм) з різною товщиною шару Ag (0 нм, 3 нм, 30 нм) отримано за кімнатної температури на підкладинки SiO<sub>2</sub>(100 нм)/Si(001) і піддано подальшому відпалу за температур 100 °C – 900 °C протягом 30 с у вакуумі. Дослідження проводились методами рентгеноструктурного фазового аналізу, резистометрії, мас-спектрометрії вторинних нейтралей та SQUID магнітометрії. Показано, що початок хімічного впорядкування одношарових композицій FePt спостерігається за температури відпалу 600 °C – 700 °C. Збільшення товщини проміжного шару Ag до 30 нм знижує температуру впорядкування фази  $L1_0$ -FePt приблизно на 100 °C. Відпали за більш високих температур приводять до подальшого збільшення об'ємної частки впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt, а також до дифузії Ag у напрямку вільної поверхні, про що переконливо свідчать результати пошарового хімічного аналізу методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних частинок. Крім того, через обмежену розчинність Ag у фазі FePt очікується, що Ag буде розташовуватися в границях зерен. Збільшення об'ємної частки фази  $L1_0$ -FePt також відображається на

збільшенні коерцитивності плівок, яка досягає значення  $\sim 19$  кЕ після відпалу за температури  $900^\circ\text{C}$ . Спостерігається ізоотропія магнітних властивостей досліджуваних плівок, що обумовлюється випадковою орієнтацією зерен впорядкованої фази.

В роботі [21] досліджено магнітні властивості та мікроструктуру плівок FePt-C, вирощених на комбінованих проміжних шарах MoC та TiOC/MoC. Для того аби досягти зміни магнітних властивостей та мікроструктури плівки FePt нанесено проміжний тонкий шар TiOC з меншими поверхневою енергією та параметром кристалічної решітки, в порівнянні з шаром MoC. Виявлено, що при використанні комбінованого проміжного шару TiOC/MoC ширина дифракційного максимуму (001) FePt зменшилось з  $7,1^\circ$  до  $6,2^\circ$ , що свідчить про досягнення епітаксiального росту на проміжному шарі TiOC за рахунок меншої невідповідності параметрів кристалічної будови. Магнітна анізотропія плівки FePt/TiOC(2 нм)/MoC/CrRu становила 11 кЕ, що перевищує значення анізотропії плівки FePt, нанесеної на шар MoC (8,1 кЕ). Більш дрібна та щільна зеренна структура спостерігалась у плівкових зразках FePtC(17 ат.%, 29 ат.%, 38 ат.%) / TiOC(2 нм) / MoC / CrRu.

В роботі [22] досліджено вплив легування C плівкових композицій FePt. В даній роботі плівкові зразки Fe/Pt та C/Fe/Pt з різною конфігурацією шарів отримано методом імпульсного лазерного осадження, після чого досліджено їх мікроструктуру та магнітні властивості. Порівняно з багатошаровими композиціями  $[\text{Fe}(0,972 \text{ мкм})/\text{Pt}(1,192 \text{ мкм})]$  та  $[\text{Fe}(0,486 \text{ мкм})/\text{Pt}(0,596 \text{ мкм})]_2$  більш високі показники магнітних властивостей з коерцитивністю приблизно 875 кА/м спостерігаються у плівці  $[\text{Fe}(0,243 \text{ мкм})/\text{Pt}(0,298 \text{ мкм})]_4$ , що обумовлено прискоренням дифузії між шарами Fe та Pt меншої товщини. Автори роботи припускають, що введення додаткового шару C приводить до очищення зерен плівок, що в свою чергу приводить до підвищення коерцитивної сили до 1200 кА/м та поліпшення обмінної взаємодії між магнітно-твердою та магнітно-м'якою фазами.

В роботі [23] досліджено мікроструктуру та магнітні властивості тонких

плівок на основі FePt, вирощених на проміжних шарах TiN-ZrO<sub>2</sub> та TiN-ZrO<sub>2</sub>/TiN. Проміжний шар TiN-ZrO<sub>2</sub> в своїй структурі має зерна твердого розчину Ti(Zr)ON, що відокремлені аморфним ZrO<sub>2</sub>. Виявлено, що при додаванні ZrO<sub>2</sub> в проміжний шар TiN, розмір зерен плівок FePt-SiO<sub>2</sub>-C значно зменшується. В той самий час, спостерігається покращення ізоляції зерен і розподілу зерен за розмірами. Однак магнітні властивості плівок FePt-SiO<sub>2</sub>-C, вирощених на проміжних шарах TiN-ZrO<sub>2</sub>, помітно погіршились, що обумовлено порушенням епітаксiального росту FePt через аморфний ZrO<sub>2</sub> в проміжному шарі TiN-ZrO<sub>2</sub>. Для покращення текстури TiN-ZrO<sub>2</sub> (002) та кристалічної будови TiN-ZrO<sub>2</sub> введено комбінований проміжний шар TiN-ZrO<sub>2</sub>/TiN, що сприяло значному покращенню магнітних властивостей та зменшенню розміру зерен плікової композиції. В плівкових композиціях FePt(4 нм)/SiO<sub>2</sub>(40 об. %)/C(20 об. %), вирощених на комбінованому проміжному шарі TiN/TiN-ZrO<sub>2</sub>(30 об. %), спостерігалась виражена переважна орієнтація зерен FePt у напрямку [001] з коерцитивністю ~ 17,6 кЕ та середнім розміром зерна 6,5 нм.

### **1.3 Вплив наявності Au в плівкових композиціях Pt/Fe на їх структурно-фазовий стан та магнітні властивості**

Досить велика кількість досліджень присвячена вивченню процесів дифузії та формування впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt при відпалі плівкових композицій за низьких температур. Так в роботі [24] досліджено вплив додаткового проміжного шару Au на процеси низькотемпературного дифузійного фазоутворення в нанорозмірних плівкових композиціях Pt/Au/Fe. Зразки отримано методом магнетронного осадження, дослідження структурно-фазового складу виконано методами мас-спектрометрії вторинних нейтралей і рентгеноструктурного фазового аналізу. Виявлено, що введення проміжного шару Au приводить до більш інтенсивного дифузійного перемішування шарів Pt і Fe та формування впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt. Процеси дифузійного формування неупорядкованої фази  $A1$ -FePt і впорядкованої  $L1_0$ -FePt у даному випадку відбуваються за специфічним механізмом – шляхом перетворень,

індукованих зернограничною дифузією, за яких кінцева фаза формується через рух границь зерен у напрямках, перпендикулярних до їх вихідних положень. Більш швидка гомогенізація та формування впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt за наявності проміжного шару Au пов'язані з акумуляцією напружень при зернограничних перетвореннях: неупорядкована фаза  $A1$ -FePt, яка починає формуватись у границях зерен Pt і Au, перебуває під дією напружень стиску уздовж напрямку  $[001]$ , що може сприяти процесу впорядкування й утворенню фази  $L1_0$ -FePt.

В роботі [25] досліджено вплив введення додаткового проміжного шару Au у плівкові композиції на основі FePt. Авторами даної статті досліджено три серії зразків: плівковий матеріал FePt(10 нм), багат шарову композицію  $[\text{Fe}(0,5 \text{ нм})/\text{Pt}(0,5 \text{ нм})]_{10}$  і багат шарову композицію з додатковими шарами поверхнево-активного елементу Au  $[\text{Fe}(0,5 \text{ нм})/\text{Pt}(0,5 \text{ нм})/\text{Au}]_{10}$ . Проведені дослідження дозволили виявити, що плівка, яка не містить додаткових шарів має найменше значення магнітної анізотропії, а плівкова композиція з проміжним шаром Au навпаки проявляє найбільш виражену магнітну анізотропію в порівнянні з іншими зразками. Також доведено, що ступінь впорядкування та коерцитивна сила зростають зі збільшенням вмісту додаткового легуючого елементу. Автори припускають, що дані ефекти зумовлені енергією границь розділу, яка слугує додатковою рушійною силою формування впорядкованої фази та перебігу дифузійних процесів в досліджуваних плівкових композиціях. Також показано, що введення додаткового шару Au приводить до зменшення температури впорядкування на  $100^\circ\text{C}$ . Подібні явища досліджено в роботі [26]. Авторами даної роботи вивчались плівкові композиції з впорядкованою фазою  $L1_0$ -FePt з переважною орієнтацією зерен в напрямку  $[001]$  виготовлені шляхом відпалу тришарових композицій Fe/Pt/X (X: Cu та Au) за температур  $500^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C}$  протягом 120 хв. в атмосфері  $\text{H}_2$ . Плівка FePtCu характеризувалась температурою Кюрі  $\sim 280^\circ\text{C}$  і різкою зміною перпендикулярної коерцитивності за температури близько  $200^\circ\text{C}$ . Також введення додаткового шару Cu приводить до зниження температури

впорядкування на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  у порівнянні з композиціями FePt. В той самий час, температура процесу впорядкування знизилась на  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  після введення шару Au до плівки FePt, а коерцитивність збільшилась до 5,8 кЕ.

В роботі [27] досліджено вплив введення додаткового проміжного шару Au на магнітні властивості плівок FePt. Зразки Au/FePt отримано шляхом осадження шару Au за кімнатної температури на впорядкований шар FePt з подальшим відпалом за температури  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  з метою ініціалізації перебігу дифузійних процесів між шарами. Після осадження і високотемпературного відпалу атоми Au не розчиняються в ґратці впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt. За результатами трансмісійної електронної мікроскопії виявлено, що у порівнянні із плівкою FePt, зразки Au(60 нм)/FePt(60 нм) характеризуються зернистою структурою з частинками FePt, вбудованими в матрицю Au. Коерцитивність зразка Au(60 нм)/FePt(60 нм) становить 23,5 кЕ, що на 85 % більше, ніж коерцитивна сила плівки FePt без додаткового шару Au. Збільшення значення даної магнітної характеристики можна пояснити формуванням ізольованої структури впорядкованої фази FePt.

В роботі [28] досліджено вплив товщини додаткових шарів Au на магнітні властивості плівок FePt. Тришарові зразки Au(60 нм)/FePt( $\delta$  нм)/Au(60 нм) отримано розпорошенням за кімнатної температури з подальшим відпалом за різних температур. Для зразка з  $\delta = 60$  нм впорядкування з формуванням фази  $L1_0$ -FePt відбувається за температури  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Коерцитивність збільшується за температур відпалу в діапазоні  $400\text{ }^{\circ}\text{C} - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Значення коерцитивності тришарових плівок також змінюється в залежності від товщини проміжного шару FePt від 27 кЕ для  $\delta = 60$  нм до максимального значення 33,5 кЕ для  $\delta = 20$  нм (рис. 1.6). За результатами рентгеноструктурного аналізу виявлено, що дифузія атомів Au в решітку  $L1_0$ -FePt є незначною навіть після високотемпературного ( $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) відпалу. Крім того, ступінь впорядкування не зазнає суттєвих змін при зменшенні параметру  $\delta$  з 60 нм до 15 нм. Результати досліджень методом трансмісійної електронної мікроскопії вказують на те, що дрібні частинки  $L1_0$ -FePt заміщуються більшими за розміром частинками Au.

Автори даної роботи вважають, що висока коерцитивність тришарового зразка пояснюється малими і рівномірними зернами впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt, які розділені між собою матрицею Au.

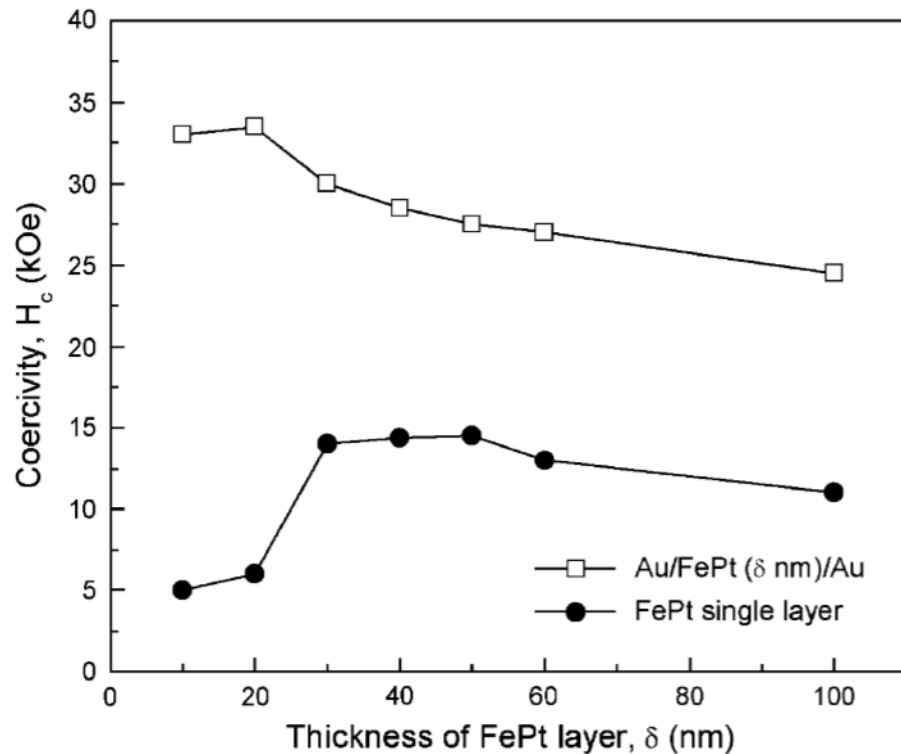


Рисунок 1.6 – Залежність коерцитивної сили від товщини шару FePt в зразках Au(60 нм)/FePt( $\delta$  нм)/Au(60 нм) та FePt( $\delta$  нм) після відпалу за температури 800 °C протягом 30 хв [28]

#### 1.4 Висновки до розділу 1

1. Нанорозмірні плівкові композиції на основі FePt з впорядкованою фазою  $L1_0$ -FePt є перспективним матеріалом для використання в якості носіїв магнітного запису інформації завдяки високим значенням магнітокристалічної анізотропії та коерцитивної сили.

2. Введення додаткових проміжних шарів легуючих елементів може чинити істотний вплив на закономірності перебігу дифузійних процесів, формування структурно-фазових станів, процеси впорядкування, а отже – і на магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt.

3. Введення Au в якості легуючого елементу до складу плівок FePt



приводить до зниження температури і ступеню впорядкування даних композицій, а також до підвищення значень магнітної анізотропії та коерцитивної сили. Також наявність Au в якості легуючого елементу в плівках FePt приводить до прискорення дифузії Fe в шар Pt, що імовірно зумовлено енергією границь розділу, яка слугує додатковою рушійною силою перебігу дифузійних процесів.

4. Введення додаткового шару Au в плівкові композиції Pt/Fe дозволяє регулювати швидкість перебігу дифузійних процесів в залежності від відстані до шару Au, а, отже – забезпечує можливість створення магнітно-градієнтних плівкових матеріалів з нерівномірним розподілом фазового складу за їх товщиною.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Магнетронне осадження

Досліджувані плівкові композиції отримано методом магнетронного осадження. Принцип дії магнетронної системи розпорошення показано на рис. 2.1. Основними елементами пристрою є катод-мішень, анод і магнітна система. Силкові лінії магнітного поля замикаються між полюсами магнітної системи. Поверхня мішені, розташована між місцями входу і виходу силових ліній магнітного поля, інтенсивно розпорошується. Потік розпорошених частинок має вигляд замкнутої доріжки, геометрія якої визначається формою полюсів магнітної системи. При подачі постійної напруги між мішенню (негативний потенціал) і анодом (позитивний або нульовий потенціал) виникає неоднорідне електричне поле і збуджується аномальний тліючий розряд. Наявність замкнутого магнітного поля біля поверхні мішені дозволяє локалізувати плазму безпосередньо у мішені [29].

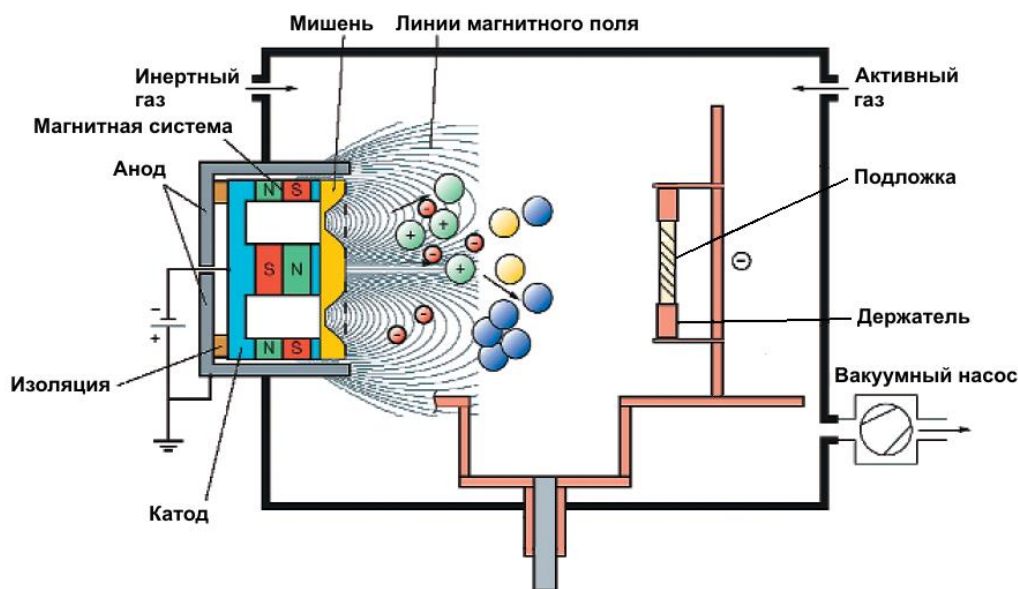


Рисунок 2.1 – Принципова схема магнетронної системи розпорошення [30]

Емітовані з катода під дією іонного бомбардування електрони здійснюють рух по замкнутих траєкторіях біля поверхні мішені. Електрони виявляються в

пастці, створюваної з одного боку магнітним полем, що повертає електрони на катод, а з іншого боку негативно зарядженою поверхнею мішені, що їх відштовхує. Електрони здійснюють циклічний рух в цій пастці до тих пір, поки не відбудеться кілька іонізуючих зіткнень з атомами робочого газу, в результаті яких електрон втратить отриману від електричного поля енергію і дифундує на границю плазми у напрямку до анода. Таким чином, більша частина енергії електрона, перш ніж він потрапить на анод, використовується на іонізацію і збудження атомів робочого газу (найчастіше аргону), що значно збільшує ефективність процесу іонізації і призводить до зростання концентрації позитивних іонів біля поверхні мішені. Це у свою чергу зумовлює збільшення інтенсивності іонного бомбардування мішені і значне зростання швидкості розпорошення, а, отже і швидкості осадження плівки [29].

В даній роботі плівкові композиції Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) отримано методом магнетронного осадження на підкладки термічно окисненого монокристалічного Si(001) на приладі BESTEC UHV. Базовий тиск робочої системи становив  $5 \times 10^{-6}$  Па, робочий тиск Ar при осадженні –  $5 \times 10^{-1}$  Па. Швидкість осадження шару Pt становила 0,47 Å/с, Fe – 0,36 Å/с, Au – 0,39 Å/с. Контроль товщини шарів досліджуваної плівкової композиції здійснювався зважаючи на відому швидкість розпорошення кожної мішені, визначеної експериментально для даних параметрів роботи магнетронної системи.

## **2.2 Фізико-технологічні параметри термічної обробки плівкових зразків**

Термічну обробку зразків проведено на установці ВУП-5М у вакуумі  $10^{-3}$  Па, за температури 150 °С з витримкою в інтервалі від 30 хв. до 36 год. Середня швидкість нагріву становила 10,7 °С/хв. Контроль температури під час термічної обробки здійснювався за допомогою термопари Ni-NiCr, що була підведена до поверхні зразка.

### 2.3 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

В основі методу рентгеноструктурного фазового аналізу лежить взаємодія рентгенівського випромінювання з кристалічною решіткою речовини, в результаті якої виникає дифракція рентгенівських променів.

Дифракція рентгенівських променів – розсіяння рентгенівських променів кристалами (або молекулами рідин і газів), при якому з початкового пучка променів виникають вторинні відхилені пучки тієї ж довжини хвилі, що з'явилися в результаті взаємодії первинних рентгенівських променів з електронами речовини; напрямок і інтенсивність вторинних пучків залежать від будови розсіюючого об'єкта. Дифракційна картина залежить від довжини хвилі використовуваних рентгенівських променів і будови об'єкта. Найбільш успішно цей метод застосовують для встановлення атомної структури кристалічних тіл. Це зумовлено тим, що кристали мають строгу періодичність будови і являють собою дифракційну решітку для рентгенівських променів [31].

Умовою дифракції рентгенівського випромінювання на кристалічній решітці твердого тіла є формула Вульфа-Брегга, що визначає напрямок дифракційних максимумів пружно розсіяного випромінювання на кристалі досліджуваного матеріалу [32].

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad (2.1)$$

де  $d$  – міжплощинна відстань;

$\theta$  – кут ковзання (бреггівський кут);

$n$  – порядок відбиття;

$\lambda$  – довжина хвилі.

В даній роботі рентгеноструктурний аналіз досліджуваних плівкових композицій проведено на дифрактометрі Rigaku Ultima IV у випромінюванні мідного аноду з довжиною хвилі:  $\lambda_{K\alpha} = 1,54 \text{ \AA}$ . Зйомку проведено в інтервалі кутів  $2\theta = 20^\circ - 60^\circ$  з кроком  $0,04^\circ$  та витримкою в кожній точці 2 с.

Рентгенівський дифрактометр складається з джерела рентгенівського

випромінювання, гоніометра, в який поміщають досліджуваний зразок, детектора випромінювання та електронного вимірювально-реєструючого пристрою. Детектором в рентгенівському дифрактометрі служить не фотоплівка, як у рентгенівській камері, а лічильники квантів електромагнітного випромінювання. Дифракційну картину від зразка в рентгенівському дифрактометрі отримують послідовно: лічильник переміщується в процесі вимірювання і реєструє енергію випромінювання, що потрапила в нього за певний інтервал часу. Порівняно з рентгенівськими камерами рентгенівський дифрактометр має більш високу точність, чутливість, більшу швидкість зйомки. Процес отримання інформації в рентгенівському дифрактометрі може бути повністю автоматизований, оскільки в ньому відсутня необхідність проявлення фотоплівки, причому в автоматичному рентгенівському дифрактометрі керування і обробка даних здійснюється за допомогою комп'ютера. Універсальні прилади можна використовувати для різних рентгеноструктурних досліджень, замінюючи приставки до гоніометру. У великих лабораторіях застосовуються спеціалізовані дифрактометри, призначені для вирішення будь-яких задач рентгеноструктурного аналізу [31].

## **2.4 Мас-спектрометрія вторинних нейтральних частинок**

Явище видалення атомів та молекул з поверхні твердого тіла та їх подальший аналіз у мас-спектрометрії лежить в основі визначення поверхневого хімічного складу твердих тіл. Метод мас-спектрометрії вторинних нейтральних частинок дозволяє проведення аналізу нейтральної компоненти розпорошених під дією первинного іонного пучка частинок, яка є домінуючою в загальному потоці емітованих частинок. Для того, щоб нейтралі можна було аналізувати мас-спектрометричними методами, після розпилення з зразка вони повинні бути іонізовані будь-яким способом (так звана «постіонізація» нейтралей). Завдяки розподілу процесів іонізації і розпилення часток в просторі і часі, чутливість приладу з даного досліджуваного елементу є сталою для даних умов експерименту. Це робить кількісну інтерпретацію результатів, тобто кореляцію

між мас-спектрометричними сигналами і відповідними їм концентраціями елементів, простою і визначеною. Як правило, позитивно заряджені іони для мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток отримують одним з трьох основних способів [33]:

- іонізацією прискореним пучком електронів;
- іонізацією високоенергетичною («гарячою») складовою електронної компоненти плазми низького тиску;
- фотоіонізацією інтенсивним лазерним випромінюванням.

Кожен з трьох перерахованих вище методів має свої переваги і недоліки. За ефективністю іонізації найменше значення має іонізація електронним пучком (порядку  $10^{-4} - 10^{-5}$ ). Більш високий показник у іонізації в плазмі (близько  $10^{-2}$ ), що пояснюється більшою довжиною пробігу розпорошених атомів в іонізованому об'ємі і компенсацією об'ємного заряду електронів позитивними іонами плазми. Найвищі значення ефективності іонізації досягаються при лазерному механізмі іонізації. Тут можливе досягнення значень, близьких до 1 (тобто повного насичення) в резонансному режимі для певного сорту атомів зразка, а в багатофотонному нерезонансному режимі – при досить високій потужності лазерного випромінювання (більш  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>) [34].

В даній роботі дослідження методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних частинок проводилось на приладі INA-X. Площа поверхні, що розпорошувалась становила в діаметрі 3 мм. Для отримання вищої роздільної здатності за глибиною ( $< 2$  нм), а також високої інтенсивності для подальшого визначення концентрації, до зразка прикладалась напруга 350 В.

## **2.5 Чотиризондовий метод вимірювання питомого опору**

Для вимірювання поверхневого опору тонких плівок використовують чотиризондовий метод вимірювання питомого опору. В основі методу лежить явище розтікання струму в точці контакту металевого вістря з металевою плівкою. Перевагою даного методу є те, що для застосування чотиризондового методу не потрібно створення омичних контактів зі зразком. Також є можливість

проводити вимірювання питомого опору монокристалічних зразків різноманітної кристалографічної орієнтації [35].

Умови застосування чотиризондового методу:

- 1) зонди розташовані на плоскій поверхні однорідного зразка напівнескінченного об'єму;
- 2) інжекція електронів в об'єм зразка відсутня;
- 3) зонд не повинен хімічно реагувати з металевим матеріалом плівки.

Зазвичай зонди мають контакти з поверхнею зразка в точках, які розташовані вздовж прямої лінії або по кутах квадрата.

Схематично чотиризондовим метод реалізують за схемою представленою на рисунку 2.2.

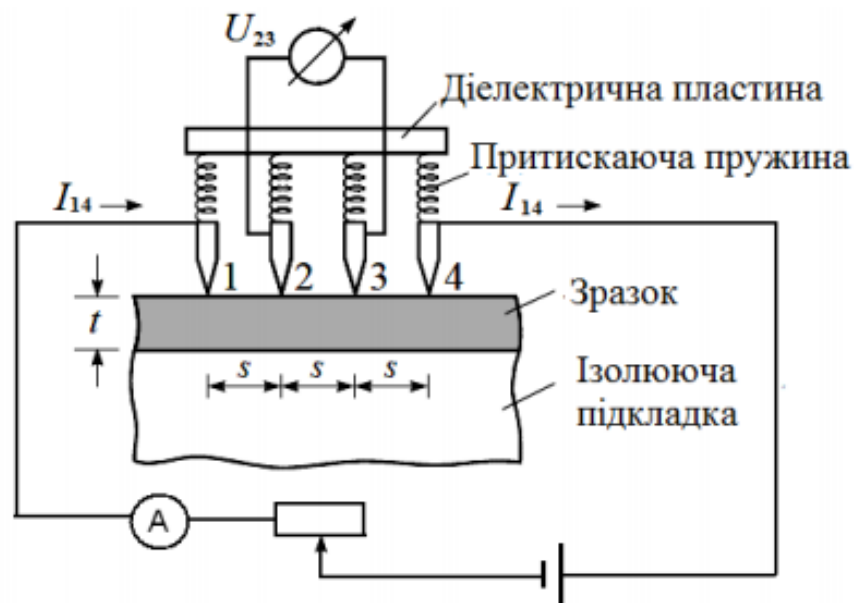


Рисунок 2.2 – Принципова схема реалізації чотиризондового методу вимірювання питомого опору [36]

На плоскій поверхні зразка вздовж прямої лінії розміщують чотири металевих голкоподібних електрода, відстані між якими  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  багато менше товщини напівпровідникового шару  $t$ . Через два зовнішніх зонда 1 і 4 пропускають електричний струм  $I_{14}$ , на двох внутрішніх зондах 2 і 3 вимірюють різницю потенціалів  $U_{23}$ . За виміряними значеннями різниці потенціалів між

зондами 2 і 3 та струму, що протікає через зонди 1 і 4, визначають питомий опір зразка [35].

## **2.6 Мас-спектрометрія вторинних іонів**

У методі мас-спектрометрії вторинних іонів поверхня зразка опромінюється первинними іонами певної енергії. Енергія первинних іонів передається атомам зразка шляхом зіткнень, в результаті чого виникає так званий каскад зіткнень. Частина енергії передається назад на поверхню, дозволяючи приповерхневим атомам і молекулам долати енергію зв'язку з поверхнею. Взаємодія групи зіткнень з поверхневими молекулами досить м'яка, що реалізовано з метою дозволити навіть великим атомам і молекулам відірватися без або з малими ушкодженнями.

Більшість випущених часток є електронейтральними, проте мала частина виявляється позитивно або негативно заряджена. Подальший аналіз випущених іонів надає детальну інформацію про елементарний і молекулярний склад поверхні.

Мас-спектрометрія вторинних іонів є дуже поверхнево-чутливою методикою, так як вторинні іони вибиваються з верхніх шарів. Розміри групи зіткнень досить малі, і вторинні іони випускаються з області декількох нанометрів в діаметрі. Тому при хорошому фокусуванні пучка первинних іонів, даний метод може бути використаний для мікроаналізу з високою чутливістю.

Мас-спектрометрія вторинних іонів – руйнуючий метод, так як частинки видаляються з поверхні. Дана властивість може бути використано для спрямованого керованого травлення твердого тіла для отримання інформації щодо розподілу хімічних елементів за товщиною матеріалу. Цей динамічний режим широко застосовується для аналізу тонких плівок, шаруватих структур і домішкових профілів.

Часопролітна мас-спектрометрія заснована на тому факті, що іони з однаковими енергіями, але різними масами рухаються з різними швидкостями. По суті, іони, що виникли в результаті короткої іонізації, прискорюються



електромагнітним полем до однакової енергії і пролітають шлях до детектора. Більш легкі іони прилітають раніше, ніж більш важкі і записуються у масовий спектр. Вимірювання часу прольоту для кожного іона дозволяє визначати його масу. Даний цикл повторюється з періодичністю, яка залежить від часу прольоту найважчого з атомів. Схему реалізації даного методу наведено на рис. 2.3.

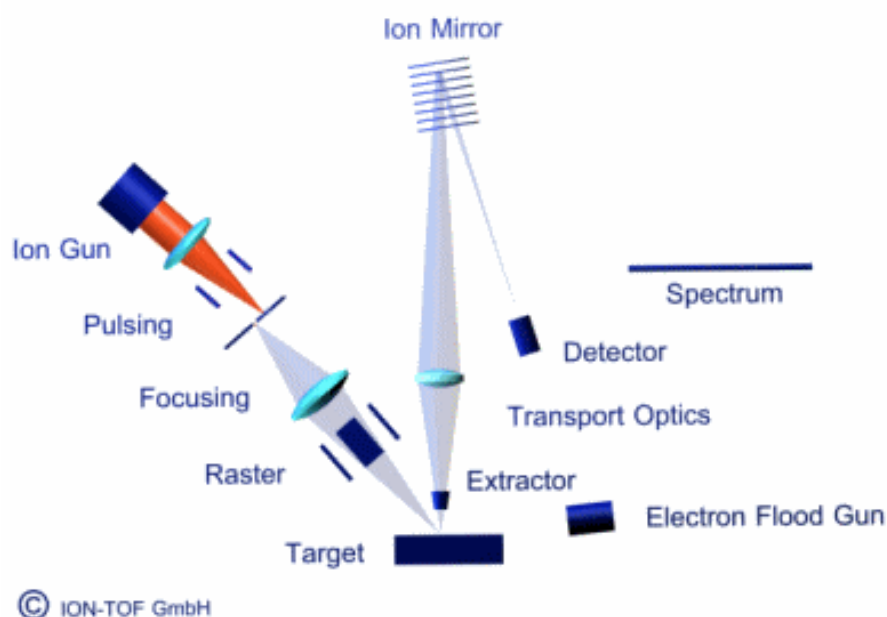


Рисунок 2.3 – Схема реалізації методу часопролітної мас-спектрометрії вторинних іонів [37]

У часопролітній мас-спектрометрії час запуску всіх вторинних іонів встановлюється за допомогою пульсуючого пучка первинних іонів. Гранично короткі іонні імпульси з тривалістю менше 1 наносекунди використовуються для отримання високої роздільної здатності за масою. Ці іонні імпульси формуються з безперервного променя за допомогою пульсуючого елемента і можуть бути стиснуті в часі за допомогою електродинамічних полів (групування).

Пульсуючий промінь може бути сфокусований в маленьку точку (іонний мікрозонд) для збудження малої досліджуваної області і «розгорнуто» для визначення просторового розподілу елементів і молекул (просторова мас-спектрометрія вторинних іонів).

Під час прольоту вторинних іонів витягуюче поле вимкнено, і електрони

низької енергії використовуються для компенсації заряду поверхні, викликаной первинними або вторинними частками (компенсація заряду). Таким чином, всі типи металевих плівкових матеріалів можуть досліджуватися без будь-яких проблем.

Час, протягом якого витягуюче поле вимкнено, може також використовуватися для бомбардування іонами низької енергії для травлення зразка. В даному випадку іони низької енергії формують кратер, центр якого аналізується пульсуючим пучком [37].

## **2.7 Висновки до розділу 2**

1. Для дослідження закономірностей розвитку дифузійних процесів та структурно-фазових перетворень в плівкових композиціях на основі FePt обрано плівки Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм), отримані методом магнетронного осадження на монокристалічні термічно окиснені підкладки кремнію з орієнтацією (001).

2. Термічна обробка у високому вакуумі плівкових зразків проводилась з метою активації дифузійних процесів, а також формування подвійної впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt.

3. Обраний комплекс методів дослідження, а саме рентгеноструктурний фазовий аналіз, пошаровий хімічний аналіз методами мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток та мас-спектрометрії вторинних іонів, а також чотиризондовий метод вимірювання електричного опору дають змогу детально дослідити структуру та фазові перетворення плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) на різних стадіях термічної обробки.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

В даній роботі проведено три серії відпалів плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) за різних температур та з різною тривалістю витримки, після чого проведено комплексне дослідження структурно-фазових характеристик плівкового матеріалу, сформованих в результаті такої термічної обробки. Зокрема необхідно було дослідити закономірності термічно-індукованого дифузійного формування структури і фазового складу плівкових композицій при низькотемпературній термічній обробці у вакуумі. Варіювання тривалості термічної обробки за такої температури дозволило б виявити особливості різних етапів термічно-індукованого фазоутворення і перебігу дифузійних процесів в досліджуваних плівкових композиціях.

#### **3.1 Структурно-фазові характеристики плівкової композиції Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після осадження**

Результати рентгеноструктурного фазового аналізу плівкової композиції Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після осадження наведено на рис. 3.1.

На дифрактограмі плівкової композиції після осадження наявні інтенсивні рефлекси Au(111) та Pt(111), також спостерігається менш інтенсивний рефлекс Fe(110). Даний набір дифракційних максимумів свідчить про відсутність перебігу дифузійних процесів в процесі магнетронного осадження металевих шарів. Отже, у вихідному стані спостерігається шарувата структура плівкової композиції. Припускається, що менша інтенсивність рефлексу Fe(110) обумовлюється більшим коефіцієнтом поглинання Fe випромінювання  $\text{CuK}_\alpha$  в порівнянні з Pt та Au.

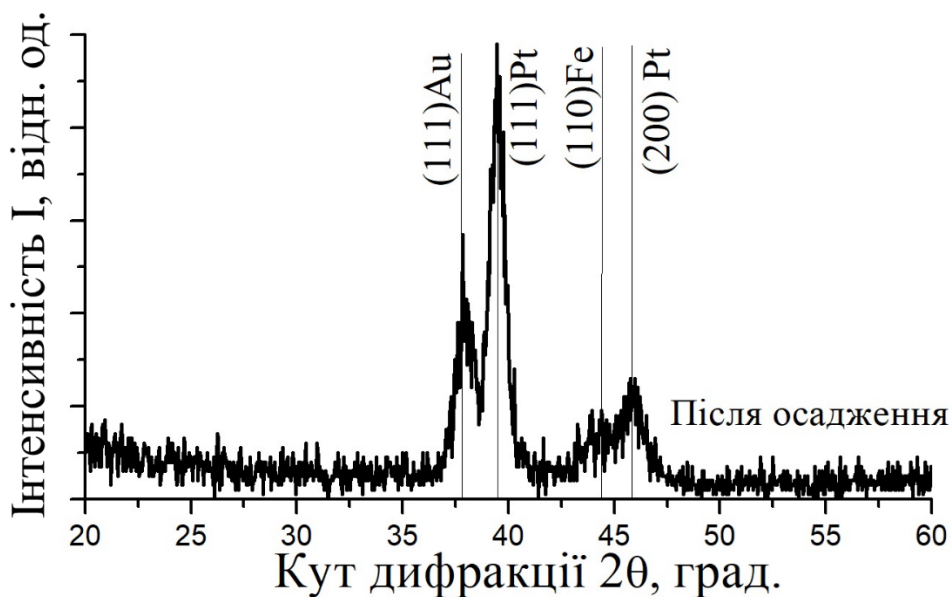


Рисунок 3.1 – Результати рентгеноструктурного аналізу плівкової композиції Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після осадження

Концентраційний розподіл хімічних елементів за товщиною плівкової композиції після осадження, отриманий методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток, наведено на рис 3.2.

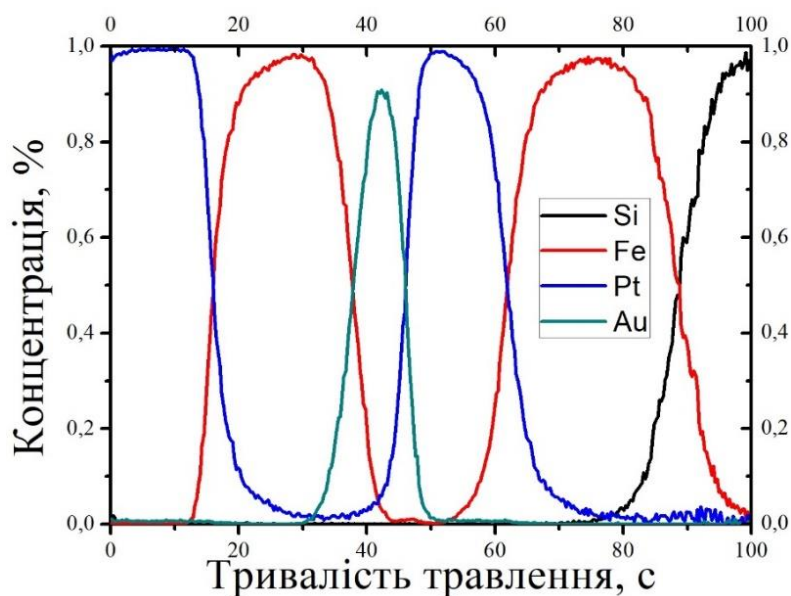


Рисунок 3.2 – Пошарові концентраційні розподіли хімічних елементів за товщиною плівкової композиції Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після осадження

Пошаровий хімічний аналіз дозволив виявити, що після осадження в структурі досліджуваних плівкових композицій дійсно спостерігаються окремі шари металів. Тобто, підтверджено, що дифузійної взаємодії між металевими компонентами композицій в процесі магнетронного осадження не відбувалось. Отримані результати щодо розподілу хімічних елементів за товщиною плівкової композиції у вихідному стані добре узгоджуються з результатами рентгеноструктурного фазового аналізу.

Результати пошарового хімічного аналізу досліджуваної плівкової композиції після осадження методом мас-спектрометрії вторинних іонів наведено на рис. 3.3.

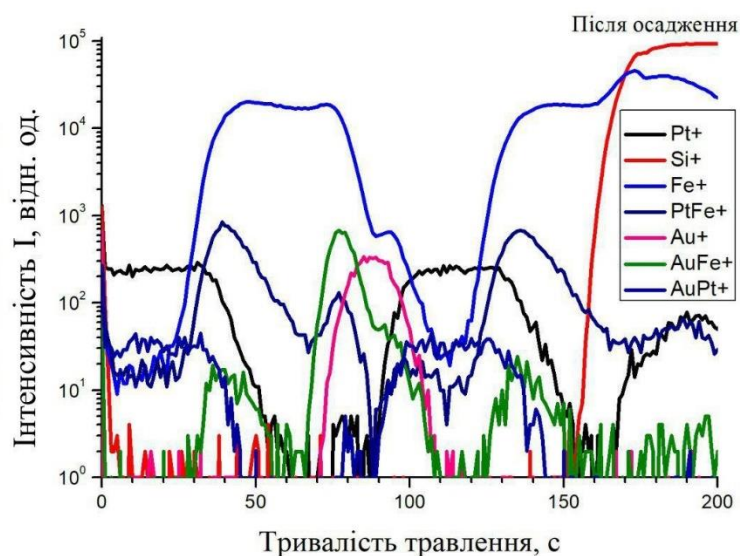


Рисунок 3.3 – Результати пошарового аналізу методом мас-спектрометрії вторинних іонів плівкової композиції

Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після осадження

З наведеного пошарового розподілу можна бачити, що після осадження спостерігаються чіткі границі поділу між металевими шарами досліджуваної плівкової композиції. Тобто дійсно має місце шарувата структура плівкової композиції. Наявність підвищеного сигналу за масами, що відповідає комплексним іонам  $\text{PtFe}^+$ ,  $\text{AuFe}^+$ ,  $\text{AuPt}^+$  пояснюється емісією іонів двох

елементів одночасно з областей, близьких до границь поділу між шарами. Наведені результати також мають добре узгодження з результатами пошарового хімічного аналізу методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток та рентгеноструктурного фазового аналізу наведеними вище.

Варто відзначити, що співвідношення товщини шарів Pt і Fe – 15,7 нм та 12 нм – у вихідній композиції вибиралось з міркувань отримання впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt еквіатомного хімічного складу після завершального етапу термічної обробки досліджуваного плівкового матеріалу.

### **3.2 Структурно-фазові характеристики плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалів з різною витримкою в температурному інтервалі 100 °C – 260 °C**

Результати рентгеноструктурного фазового аналізу плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалів з різною витримкою в температурному інтервалі 100 °C – 260 °C наведено на рис. 3.4.

Відпали в температурному інтервалі 100 °C – 150 °C з різною тривалістю витримки приводять до зміщення дифракційних максимумів Au(111), Pt(111), Fe(110) та Pt(200) в сторону більших кутів дифракції, що свідчить про активацію та перебіг дифузійних процесів в структурі плівкової композиції. Розвиток дифузійних процесів супроводжується зміною параметрів кристалічної будови металевих шарів. В свою чергу, зміна параметрів кристалічної будови обумовлює зміщення кутового положення дифракційних максимумів.

Відпал за температури 260 °C протягом 30 хвилин приводить до формування подвійної впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt про що свідчить наявність надструктурного рефлексу (001)  $L1_0$ -FePt, а також інших рефлексів від даної фази. Au не вступає у взаємодію з іншими компонентами плівкової композиції і не формує з ними інтерметалідних фаз, на що вказує наявність окремого вираженого дифракційного максимуму від даного матеріалу. Таким чином, можна стверджувати, що навіть короткотривалий відпал за температури 260 °C приводить до повної гомогенізації хімічного складу за товщиною плівкової

композиції і, більш того, до впорядкування її атомної структури.

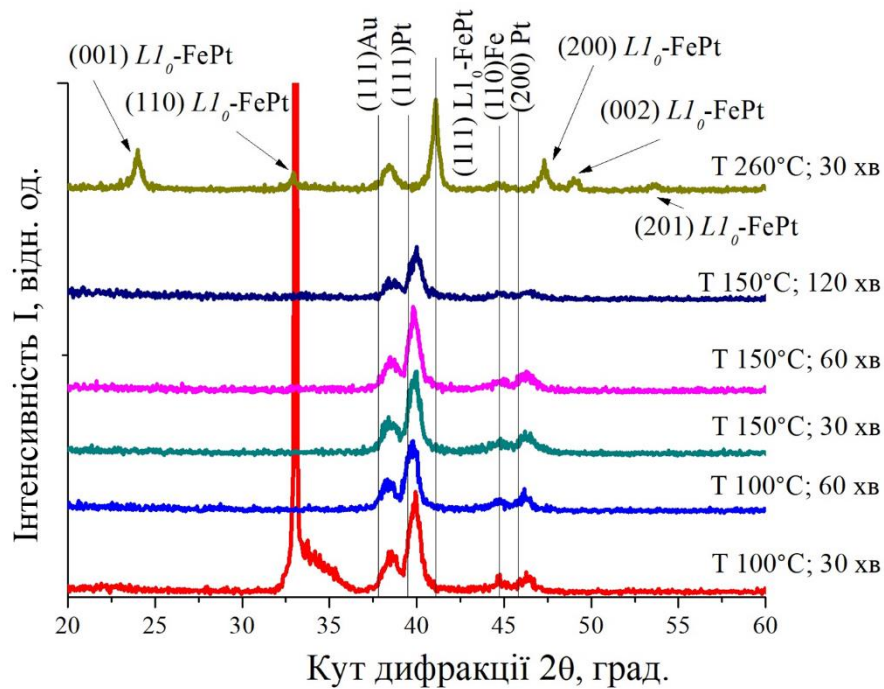


Рисунок 3.4 – Результати рентгеноструктурного аналізу плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалів з різною витримкою в температурному інтервалі 100 °С – 260 °С

Термічна обробка за такої температури не може використовуватися для поетапного дослідження розвитку дифузійних процесів і структурно-фазових перетворень в нанорозмірній плівковій системі Pt/Fe/Au/Pt/Fe.

Результати рентгеноструктурного фазового аналізу плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалів за температури 150 °С з різною витримкою наведено на рис. 3.5.

Після термічної обробки за температури 150 °С протягом 30 хвилин, як і у випадку відпалів за температури 260 °С, спостерігається зміщення дифракційних максимумів Au(111) та Pt(111) по відношенню до положення цих рефлексів, отриманих від плівкового матеріалу у вихідному стані, що свідчить про активацію дифузійних процесів в досліджуваному плівковому зразку.

При термічній обробці шаруватих плівкових зразків за температури 150 °С з витримкою 60 хвилин не спостерігається помітних змін в порівнянні з

попереднім етапом термічної обробки – відпалом з витримкою 30 хвилин.

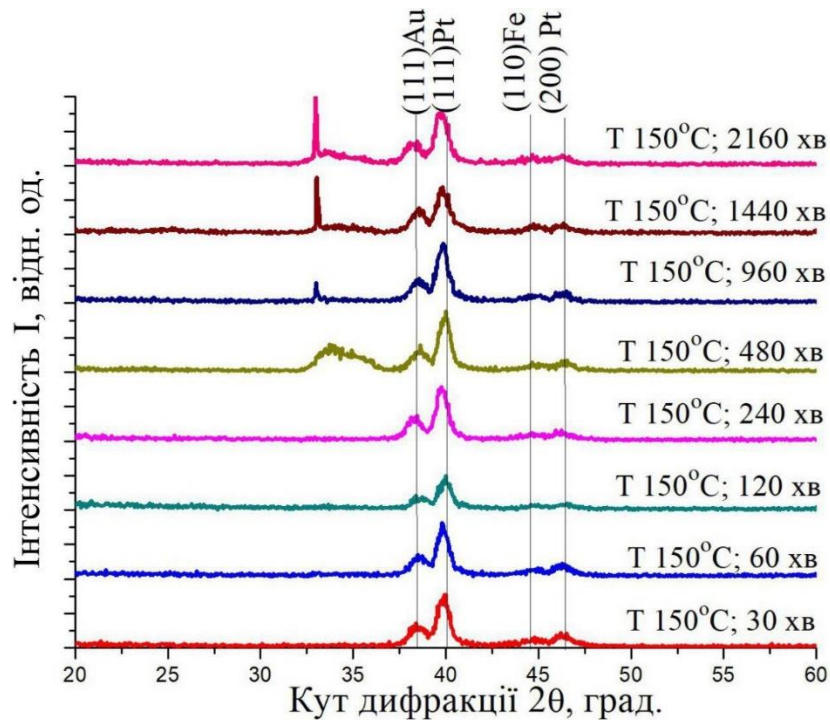


Рисунок 3.5 – Результати рентгеноструктурного аналізу плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалів з різною витримкою за температури 150 °C

Збільшення тривалості відпалу за даної температури до 2160 хвилин не обумовлює виникнення помітних змін на дифракційних спектрах, отриманих від досліджуваного плівкового матеріалу, в порівнянні з попереднім етапом термічної обробки.

З графіку залежності кутового положення дифракційних максимумів від фаз наявних в досліджуваних плівкових композиціях від тривалості відпалу за температури 150 °C (рис. 3.6) можна бачити, що починаючи з 240 хв витримки при термічній обробці кутове положення максимумів залишається майже незмінним. Тобто, збільшення тривалості відпалу за даної температури не приводить до зміни періодів кристалічної будови наявних у досліджуваному плівковому матеріалі фаз.



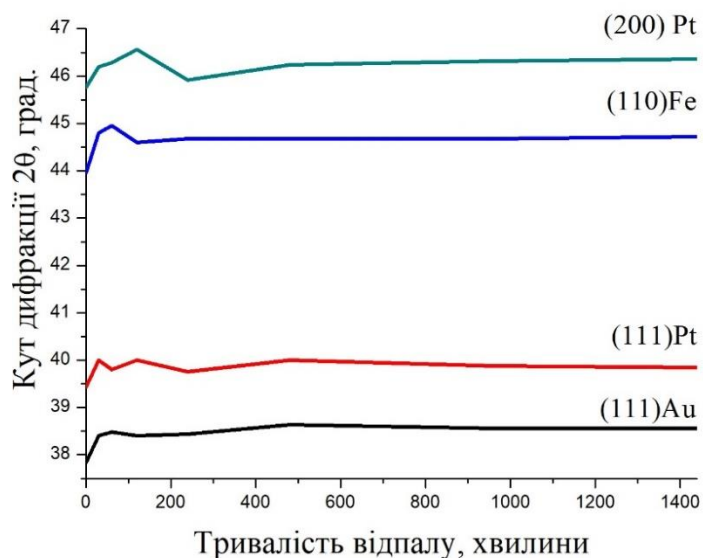


Рисунок 3.6 – Залежність кутового положення дифракційних максимумів Au(111), Pt(111), Fe(110) та Pt(200) від тривалості відпалу за температури 150 °C

За даними пошарового хімічного аналізу термічна обробка протягом 30 хвилин за температури 150 °C (рис. 3.7) приводить до активації дифузійних процесів, а саме спостерігається сегрегація Fe на границі поділу між шарами Pt та Au, а також дифузія деякої кількості Fe в шар Pt.

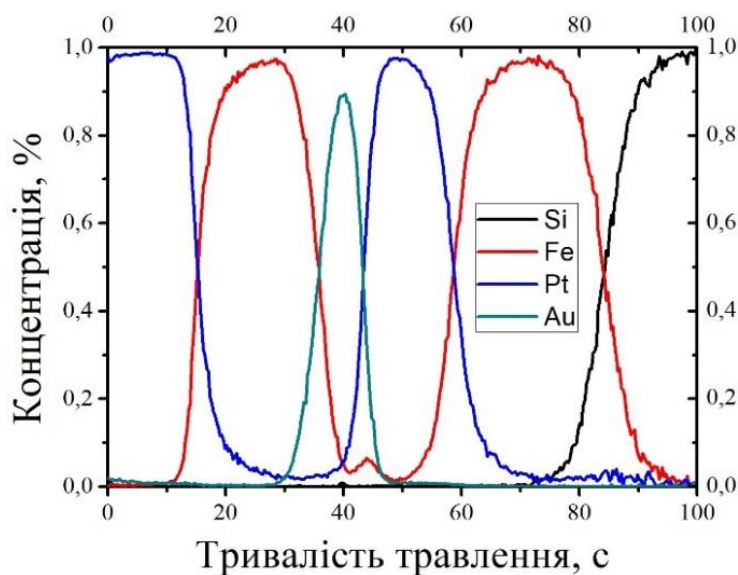
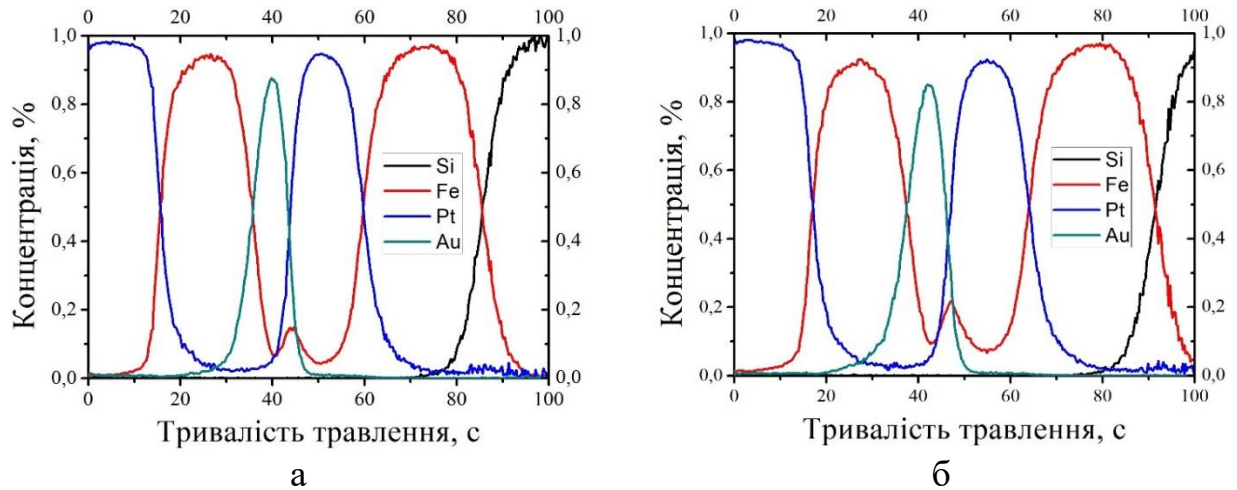


Рисунок 3.7 – Пошарові концентраційні розподіли хімічних елементів в плівковій композиції Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалів за температури 150 °C тривалістю 30 хвилин

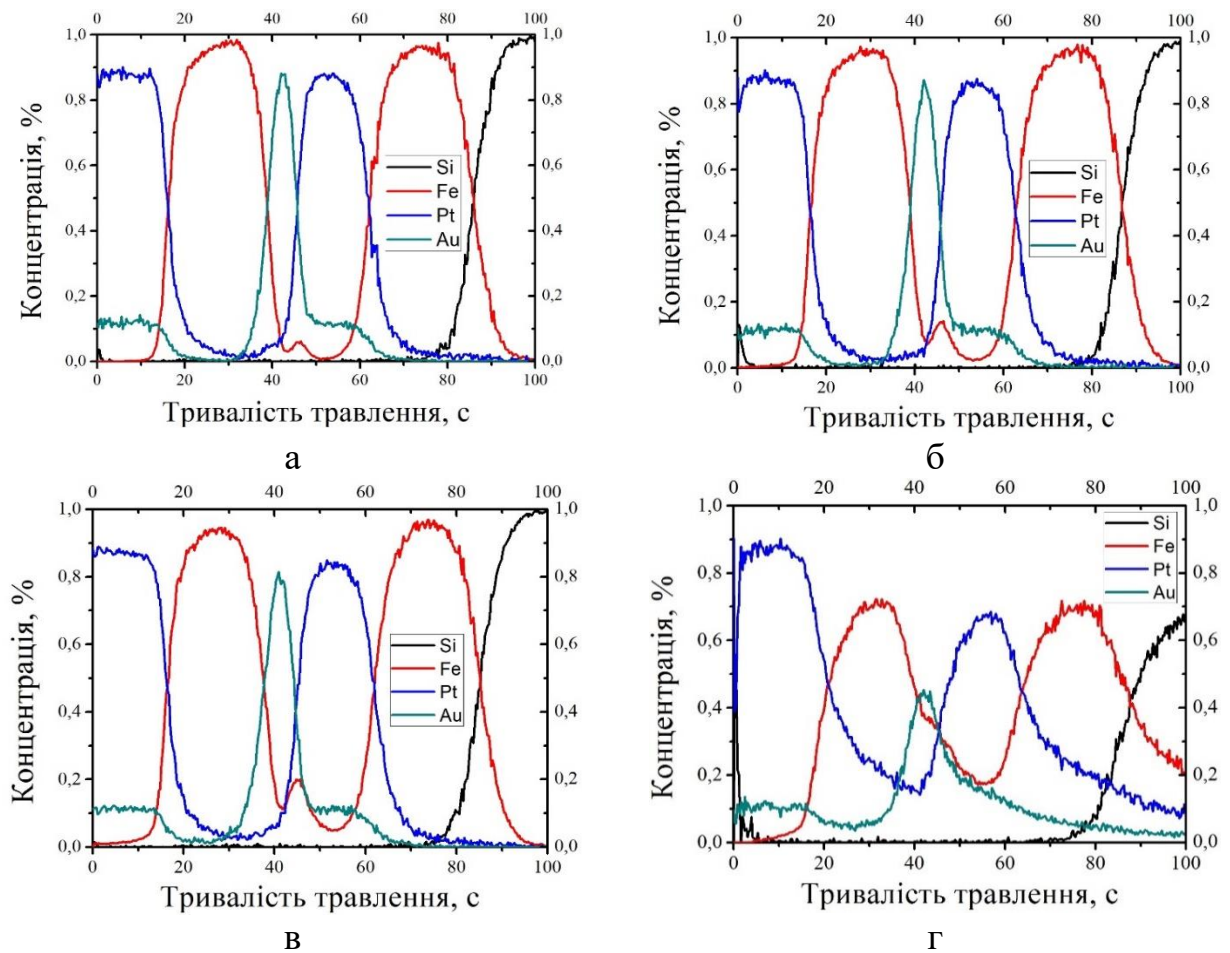
Термічна обробка з витримкою 60 хвилин та 120 хвилин (рис. 3.8, а, б) сприяє більш інтенсивному перебігу процесу дифузійного проникнення Fe в шар Pt, що також можна спостерігати на концентраційних кривих.



а – 60 хвилин; б – 120 хвилин

Рисунок 3.8 – Пошарові концентраційні розподіли хімічних елементів в плівковій композиції Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалів за температури 150 °С з різною тривалістю

На концентраційних профілях плівкових композицій, підданих відпалу з витримкою 240 хвилин (рис. 3.9, а) та 480 хвилин (рис. 3.9, б), можна бачити, що концентрація заліза, що виходить на границю поділу між шарами Pt та Au, значно менша, ніж на концентраційних профілях представлених вище. Це зумовлено не абсолютною відтворюваністю режиму термічної обробки. В попередніх результатах під час нагріву плівок спостерігався перегрів у 100 °С при виході на задану температуру на початкових етапах термічної обробки. Під час подальших відпалів цього перегріву вдалося уникнути і досягти режиму термічної обробки з більш точною витримкою заданої температури з відхиленням у 3 °С – 5 °С. Можна зробити висновки, що зазначений короткотривалий перегрів мав істотний вплив на розвиток дифузійних процесів і контрольованого ними процесу фазоутворення.



*а* – 240 хвилин; *б* – 480 хвилин; *в* – 960 хвилин; *г* – 1440 хвилин

Рисунок 3.9 – Пошарові концентраційні розподіли в плівкових композиціях Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалу за температури 150 °C з різною тривалістю

Подальша термічна обробка з більшою тривалістю відпалу (рис. 3.9, в, г) приводить до більш інтенсивної дифузії Fe з утворенням вираженого сегрегаційного шару на границі поділу між шарами Pt та Au.

На концентраційному профілі, отриманому від шаруватої плівки, відпаленої з витримкою 2160 хв (рис. 3.10), можна бачити подальшу сегрегацію Fe на границі поділу між шарами Pt та Au. Також спостерігається проникнення атомів Au в шарі Pt, відповідна концентрація становить ~15 %. Дане явище імовірно пов'язане з насиченням границь зерен Pt атомами Au з подальшою дифузійно індукованою міграцією границь зерен, що в свою чергу приводить до формування певної області з концентрацією дифузанта вищою за ту, що можна

було б пояснити простим насиченням границь зерен.

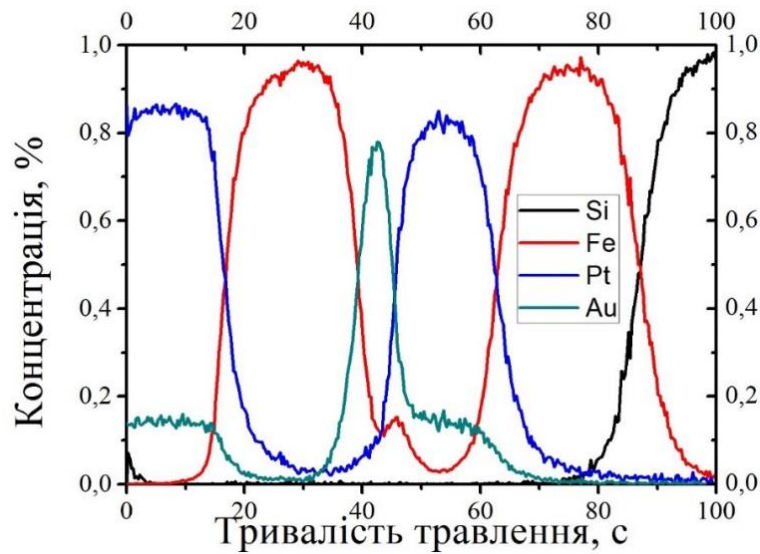


Рисунок 3.10 – Пошаровий концентраційний розподіл в плівкових композиціях Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалу за температури 150 °С із витримкою 2160 хв

Для виявлення особливостей перебігу дифузійних процесів досліджувану плівкову композицію умовно поділено попарно на шари Pt/Fe симетрично відносно шару Au. Відповідно можна умовно позначити шар Pt, який має границю поділу з вільною поверхнею, за шар Pt<sub>1</sub>, а шар Pt, що є найближчим до підкладки – за шар Pt<sub>2</sub>. З залежності концентрації Fe в шарах (Pt<sub>1</sub> та Pt<sub>2</sub>) від тривалості термічної обробки за температури 150 °С (рис. 3.11) можна бачити, що у шарі Pt<sub>2</sub> концентрація Fe значно перевищує відповідну концентрацію у шарі Pt<sub>1</sub>.

Дана різниця імовірно може бути пов'язана з несиметричним розвитком дифузійних процесів в результаті виникнення додаткових механічних напружень в досліджуваних плівкових композиціях за рахунок введення шару Au. Наявність проміжного шару Au та дифузія Fe уздовж його границь зерен може приводити до появи таких напружень. У зв'язку з нерівністю потоків Fe і Pt в границях зерен Au масоперенос розвивається з шару Fe до шару Pt. Тобто, нанокристалічний стан з великою протяжністю границь зерен у структурі може приводити до

виникнення напружень розтягу з боку Fe та стиску з боку Pt.

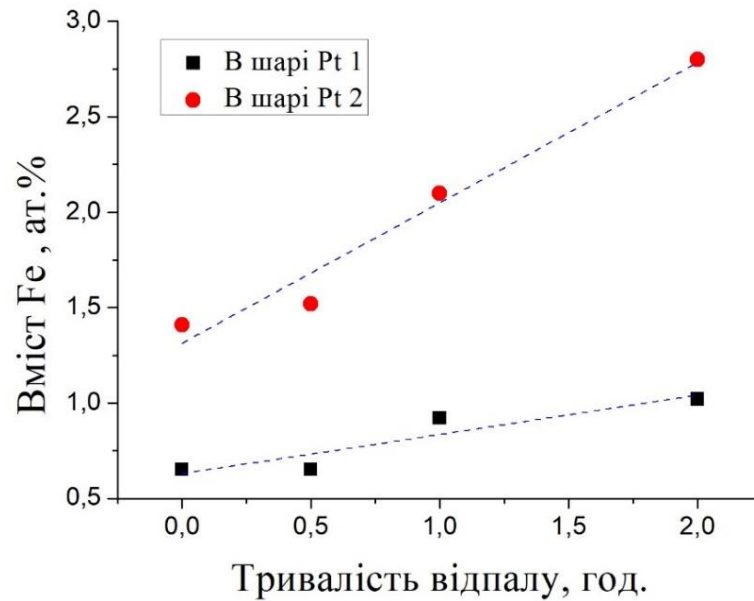


Рисунок 3.11 – Залежність вмісту Fe в шарах Pt від тривалості термічної обробки за температури 150 °С

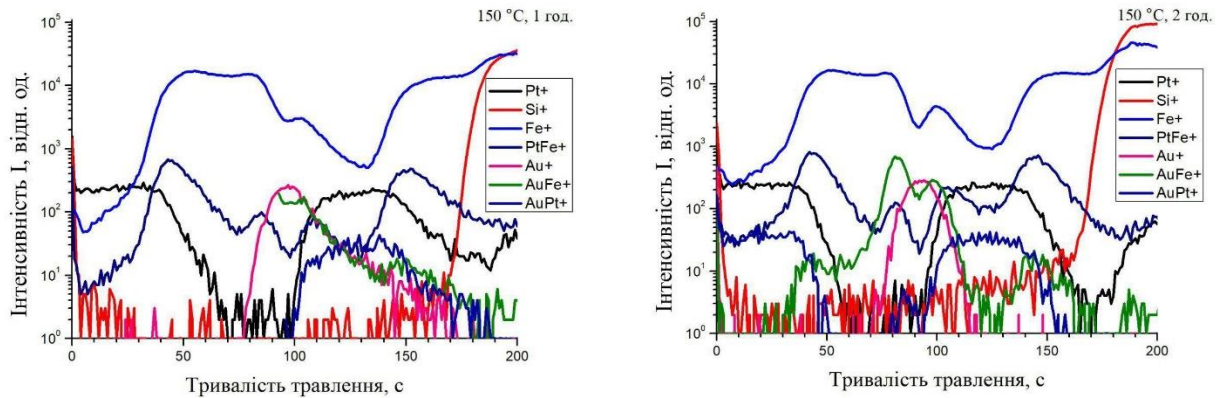
За наявності відповідних стоків/джерел (наприклад, дислокації, границі зерен, вільна поверхня, межі розділу з підкладинкою) та вхідних/вихідних атомів з обох сторін напруження можуть релаксувати, і область Fe звужиться, а область Pt розшириться. При цьому шар Au повинен зміститися до більш швидкого компонента, а саме до Fe.

Нерівномірність розподілу Fe в шарах Pt свідчить про те, що введення додаткового шару Au обумовлює можливість керування розвитком дифузійних процесів в даних плівкових композиціях – прискорення дифузії Fe в один з шарів Pt може дозволити формування мігнітно-градієнтного плівкового матеріалу на основі впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt – матеріалу з нерівномірним розподілом фазового складу, а отже і магнітних властивостей (зокрема коерцитивної сили) за товщиною без чітких границь поділу між наявними фазами.

За результатами пошарового хімічного аналізу методом мас-спектрометрії вторинних іонів можна бачити, що термічна обробка за температури 150 °С тривалістю 1 година (рис. 3.12, а) приводить до активації дифузійних процесів



на що вказує зміщення сигналу, отриманого від іонів  $\text{Fe}^+$  та сигналу від комплексних іонів  $\text{AuFe}^+$ , в порівнянні з відповідним профілем, отриманим від плівки у вихідному стані.



а – витримка 1 година; б – витримка 2 години

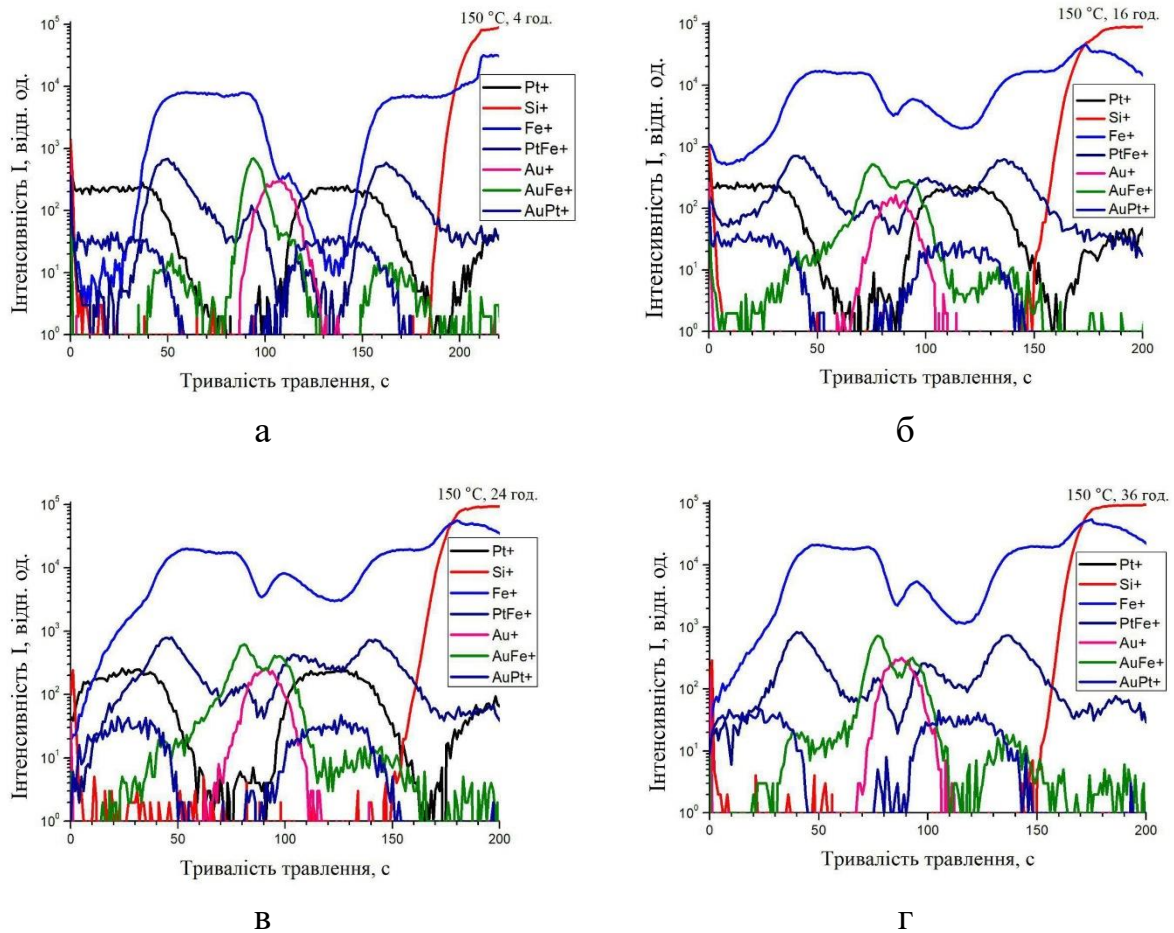
Рисунок 3.12 – Результати пошарового аналізу методом мас-спектрометрії вторинних іонів плівкової композиції

$\text{Pt}(15,7 \text{ нм})/\text{Fe}(12 \text{ нм})/\text{Au}(10 \text{ нм})/\text{Pt}(15,7 \text{ нм})/\text{Fe}(12 \text{ нм})$  після термічної обробки за температури  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  з різною тривалістю

Подальша термічна обробка за даної температури тривалістю 2 години (рис. 3.12, б) приводить до більш інтенсивного перебігу дифузійних процесів, на що вказують більш виражені зміни сигналів від мас, що відповідають комплексним іонам  $\text{PtFe}^+$  та  $\text{AuFe}^+$ .

На концентраційних розподілах плівкової композиції, підданої термічній обробці за температури  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  тривалістю 4 години (рис. 3.13, а), можна бачити досить високу подібність до концентраційних розподілів плівки після осадження. Даний ефект обумовлено не абсолютною відтворюваністю умов термічної обробки зразків, описаною раніше.

Подальша термічна обробка за даної температури з різною тривалістю (рис. 3.13, б, в, г) приводить до формування більш виражених дифузійних змін, на що вказує підвищення сигналу, отриманого від комплексного іона  $\text{PtFe}^+$ .



а – витримка 4 години; б – витримка 16 годин; в – витримка 24 години;  
г – витримка 36 годин

Рисунок 3.13 – Результати пошарового аналізу методом мас-спектрометрії  
вторинних іонів плівкової композиції

Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після термічної обробки  
за температури 150 °C з різною тривалістю

Відомо, що про перебіг термічно-індукованих дифузійних процесів та структурно-фазові зміни в нанорозмірних плівкових матеріалах можна судити за їх температурною залежністю електричного опору [38]. Однак в даній роботі за рахунок наявності деяких коливань напруги, що подавалась на джерело тепла, під час нагріву плівкових зразків на графіку залежності опору від тривалості термічної обробки (рис. 3.14) спостерігаються такі самі коливання, що значно ускладнює аналіз даних залежностей. Відповідно сформулювати точні висновки складно, однак можна стверджувати про перебіг дифузійних процесів в структурі

плівкових композицій, на що вказує підвищення електричного опору.

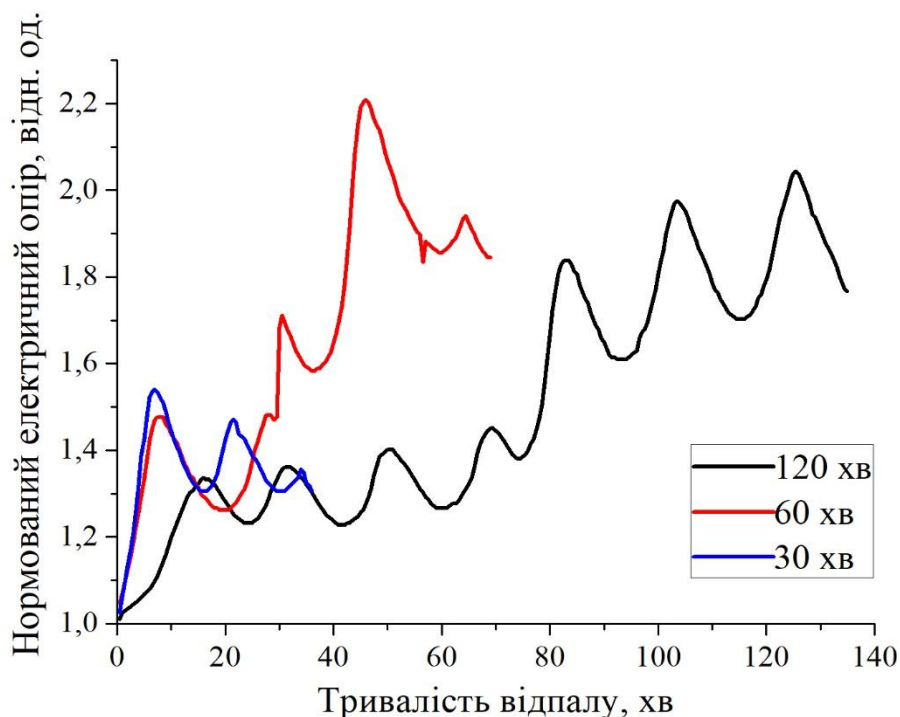


Рисунок 3.14 – Залежність відносного опору від тривалості відпалу плівкових композицій за температури 150 °C

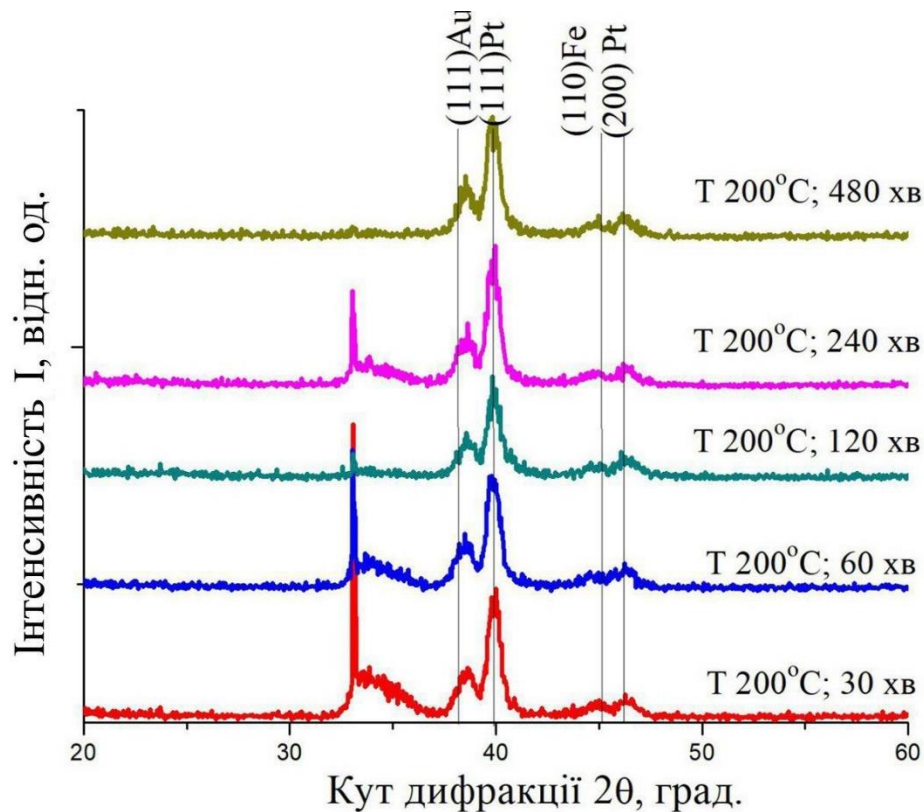
### 3.3 Структурно-фазові характеристики плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалів за температури 200 °C з різною витримкою

Результати рентгеноструктурного фазового аналізу плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалів за температури 200 °C з різною витримкою наведено на рис. 3.15.

З наведених результатів рентгеноструктурного фазового аналізу можна бачити, що відпал за температури 200 °C з різною тривалістю приводить до зміщення рефлексів в сторону більших кутів дифракції. Це ж явище спостерігається і при відпалі за температур 100 °C та 150 °C. Відсутність більш помітних структурно-фазових змін імовірно пов'язане з недостатньою кількістю енергії, що передається при термічній обробці матеріалу і відповідній неможливості інтенсивного перебігу дифузійних процесів з формуванням



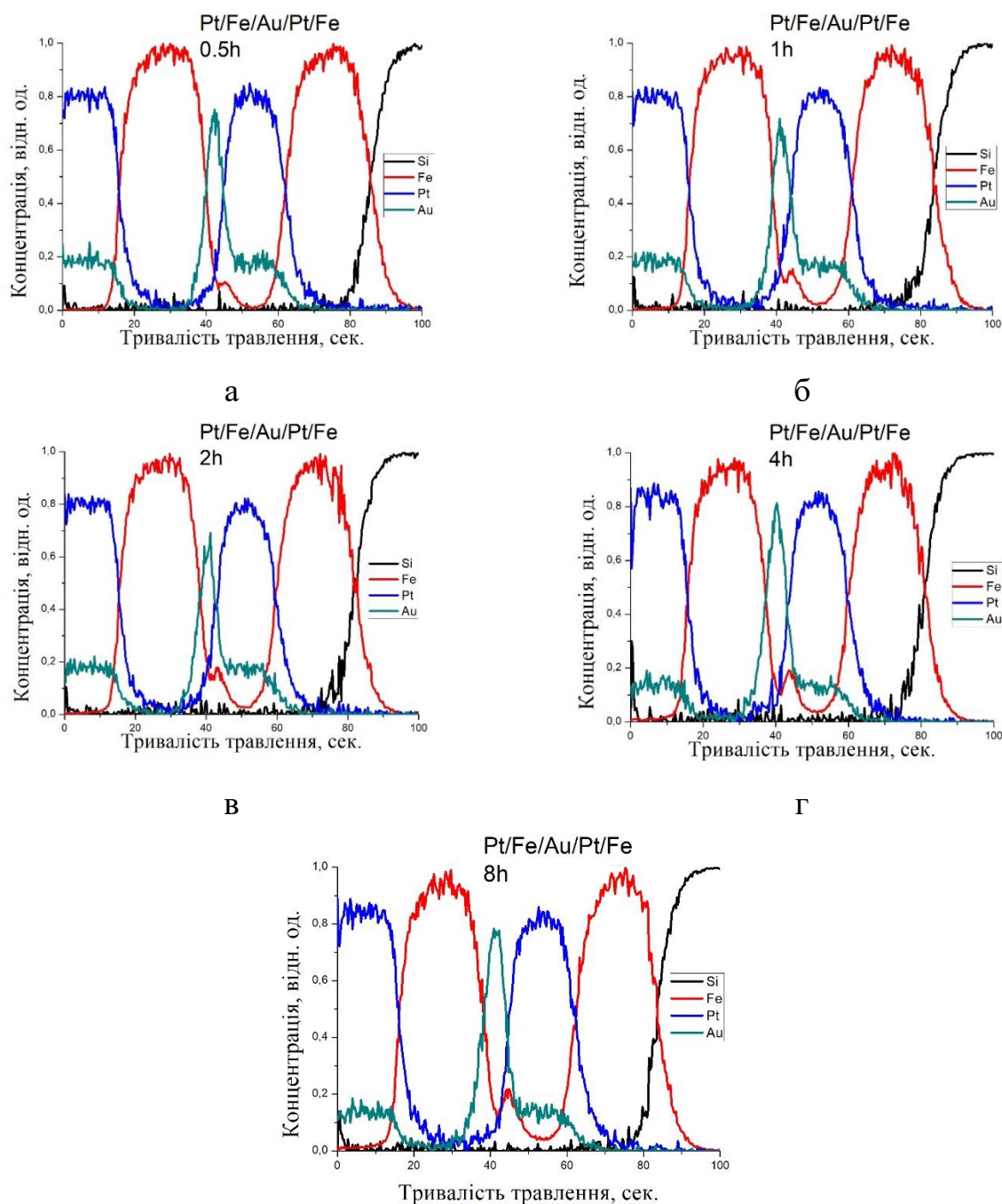
впорядкованою структури плівкової композиції. Тому можна зробити висновок, що відпали за даних температур можуть використовуватися для поетапного дослідження розвитку термічно-індукованих дифузійних процесів і структурно-фазових перетворень в нанорозмірній плівковій системі Pt/Fe/Au/Pt/Fe.



**Рис. 3.15** – Результати рентгеноструктурного аналізу плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалів з різною витримкою за температури 200 °С

Результати пошарового хімічного аналізу методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток плівкових зразків, підданих термічній обробці за температури 200 °С з різною тривалістю, наведено на рис. 3.16.

З наведених результатів можна бачити, що термічна обробка за температури 200 °С з тривалістю 30 хвилин приводить до активації процесів масоперенесення в плівковій композиції, на що вказує дифузія Fe в напрямку шару Au з утворенням вираженого сегрегаційного шару Fe на границі поділу Pt/Au. Також спостерігається проникнення деякої кількості Au в шари Pt.



Д

а – 30 хвилин; б – 60 хвилин; в – 120 хвилин; г – 240 хвилин; д – 480 хвилин

Рисунок 3.16 – Пошарові концентраційні розподіли в плівкових композиціях

Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалу за

температури 200 °С з різною тривалістю

Варто відзначити, що термічна обробка проводилась за температури, за якої дифузійні процеси, імовірно, розвиваються виключно за зернограничним механізмом. Однак, концентрація Au в шарах Pt є значно вищою за ту, яку можна

пояснити простим насиченням границь зерен дифундуючим елементом. Також необхідно приймати до уваги, що у відповідності до діаграми фазової рівноваги, в системі Pt-Au не передбачено формування інтерметалідних сполук або твердих розчинів. Відповідно, припускається, що високу концентрацію Au в шарах Pt можна пояснити розвитком дифузійних процесів за зернограничним механізмом з перебігом процесу дифузійно-індукованої міграції границь зерен: зерногранична дифузія приводить до зміщення границь зерен у напрямку, перпендикулярному до їх вихідного положення, залишаючи позаду область з підвищеною концентрацією дифузанта.

Подальша термічна обробка за даної температури з різною витримкою приводить до більш активного протікання дифузійних процесів в досліджуваних плівкових композиціях, на що вказує підвищення концентрації Fe на границі поділу між шарами Pt та Au зі збільшенням часу витримки.

На концентраційному профілі, отриманому від плівкового зразка, підданому термічній обробці за температури 200 °C тривалістю 840 хвилин (рис. 3.17), можна бачити подальшу сегрегацію Fe на границі поділу між шарами Pt та Au. Також спостерігається зниження концентрації Au на місці вихідного шару, що може свідчити про більш активну дифузію даного елемента в шари Pt.

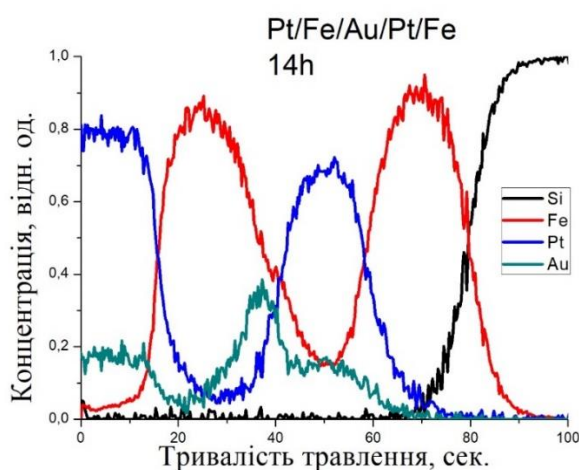


Рисунок 3.17 – Пошаровий концентраційний розподіл в плівкових композиціях Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після відпалу за температури 200 °C з тривалістю 840 хвилин

З залежності концентрації Fe в шарах ( $Pt_1$  та  $Pt_2$ ) від тривалості термічної обробки за температури 200 °С (рис. 3.18) можна бачити, що у шарі  $Pt_2$  концентрація Fe значно перевищує відповідну концентрацію у шарі  $Pt_1$ . Дане явище також спостерігалось при відпалі за температури 150 °С. Однак, за даного режиму термічної обробки концентрація Fe у шарі  $Pt_2$  вища за ту, що можна спостерігати при відпалі за температури 150 °С. Дана різниця концентрації імовірно пояснюється більш інтенсивним протіканням дифузійних процесів в плівковій композиції за рахунок отримання більшої кількості енергії від джерела нагріву під час відпалу.

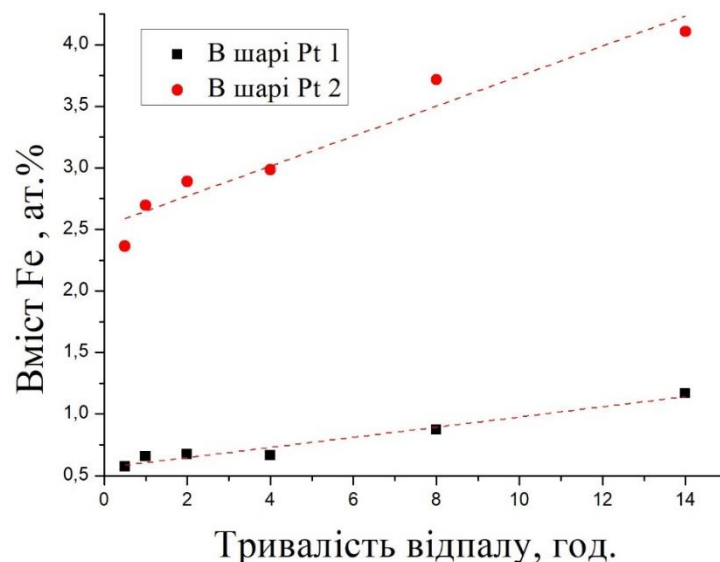


Рисунок 3.18 – Залежність вмісту Fe в шарах Pt від тривалості термічної обробки за температури 200 °С та різним часом витримки

Нерівномірний розподіл атомів Fe в шарах Pt, що спостерігався після термічної обробки за температури 150 °С зберігається і за даного режиму термообробки і підтверджує те, що введення додаткового шару Au обумовлює можливість певного керування розвитком дифузійних процесів в плівкових композиціях. Як раніше зазначалось, прискорення дифузії Fe в один з шарів Pt може забезпечити можливість формування мігнітно-градієнтного плівкового матеріалу на основі впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt – матеріалу з нерівномірним розподілом фазового складу, а отже і магнітних властивостей за товщиною.

### 3.4 Висновки до розділу 3

1. В результаті роботи виявлено, що термічна обробка в температурному інтервалі 150 °С-200 °С з варіюванням тривалості відпалу дозволяє проводити поетапне дослідження розвитку дифузійних процесів і процесів структурно-фазових перетворень в нанорозмірних плівкових системах Pt/Fe/Au/Pt/Fe через те, що при відпалах в даному температурному інтервалі спостерігається активація дифузійного перемішування між шарами Pt, Au і Fe за зернограничним механізмом.

2. Введення додаткового шару Au приводить до нерівномірності розподілу Fe в шарах Pt. Прискорення дифузії Fe в один з шарів Pt може забезпечити можливість формування мігнітно-градієнтного плівкового матеріалу на основі впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt – матеріалу з нерівномірним розподілом фазового складу, а отже і магнітних властивостей за товщиною.

## 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### 4.1 Опис ідеї проекту

Ідея проекту полягає в розробці плівкового матеріалу з високими магнітними властивостями, що може бути використаний в якості носія магнітного запису з надвисокою щільністю (табл. 4.1).

Перспективними для даного стартап-проекту є нанорозмірні плівкові композиції Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) осаджені на підкладинках SiO<sub>2</sub>/Si(001) та піддані подальшому відпалу у вакуумі за температури 200 °C з різною тривалістю.

Оцінку ринкової спроможності даного матеріалу можна дати лише в обмеженому вигляді, оскільки дослідження структурно-фазового складу, а також властивостей даного плівкового матеріалу досі тривають.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Розробка нових плівкових матеріалів для використання в якості носія магнітного запису з надвисокою щільністю	Інформаційно-комп'ютерні технології	Збільшення об'єму інформації, що зберігається на жорсткому диску та підвищення швидкості доступу до неї, зменшення розмірів носія.
	Технології магнітного запису інформації	

### 4.2 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження

Собівартість науково-дослідної роботи розраховувалась у відповідності з наступними калькуляційними статтями витрат:

- заробітна плата науково-виробничого персоналу;
- єдиний соціальний внесок;

- вартість матеріалів;
- вартість обладнання;
- інші прямі невраховані витрати;
- накладні витрати.

#### 4.2.1 Визначення заробітної плати персоналу

Розрахунок заробітної плати науково-виробничого персоналу базується на визначенні трудомісткості робіт окремих виконавців та їх денної заробітної плати.

Під час проведення науково-дослідної роботи дослідження проводили чотири виконавці: провідний науковий співробітник, старший науковий співробітник, інженер-дослідник та технік. Для КПІ ім. Ігоря Сікорського місячні посадові оклади заробітної плати складають:

- провідного наукового співробітника – 9944 грн.;
- старшого наукового співробітника – 5549 грн.;
- інженера-дослідника – 4148 грн.;
- технік – 3406 грн.

Денна заробітна плата кожного з виконавців визначається як місячна заробітна плата, поділена на середню кількість днів у місяці, враховуючи що кількість робочих днів на місяць становить 22. Таким чином, величина денної заробітної плати виконавців складає:

- для провідного наукового співробітника – 452 грн.;
- старшого наукового співробітника – 252 грн.;
- інженера-дослідника – 190 грн.;
- технік – 155 грн.

Трудомісткість виконання етапів науково-дослідної роботи наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Трудомісткість макроетапів виконання науково-дослідної роботи

Макроетапи науково-дослідної роботи	Трудомісткість, люд.-дні			
	Провідний науковий співробітник	Старший науковий співробітник	Інженер-дослідник	Технік
1. Аналіз публікацій за темою	3	6	—	—
2. Обґрунтування мети та напрямів досліджень	2	2	—	—
3. Розробка методики проведення досліджень	3	4	10	—
4. Проведення експерименту:				
4.1 Відпал та резистометрія зразків	—	7	18	7
4.2 Рентгеноструктурний аналіз плівкових композицій	—	2	2	2
4.3 Пошаровий хімічний аналіз методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних часток	—	2	4	4
4.4 Пошаровий хімічний аналіз методом мас-спектрометрії вторинних нейтральних іонів	—	2	4	4
5. Обговорення результатів	6	6	6	—
Всього	14	31	44	17

Величина фонду заробітної плати (ФЗП) обчислюється як сума добутків трудомісткості і денної заробітної плати кожного з виконавців:

$$\text{ФЗП} = 14 \times 452 + 31 \times 252 + 44 \times 190 + 17 \times 155 = 25135 \text{ грн.}$$



#### 4.2.2 Визначення розміру єдиного соціального внеску

Згідно з діючим законодавством єдиний соціальний внесок ( $B_C$ ) складає 22 % від заробітної платні.  $B_C = 0,22 \times 25135 = 5529,7$  грн.

#### 4.2.3 Визначення вартості матеріалів

В даній науково-дослідній роботі використовувались зразки Pt/Fe/Au/Pt/Fe, осажені на підкладинки монокристалічного  $\text{SiO}_2(001)$ . Дані про вартість перелічених матеріалів наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Вартість основних матеріалів

Найменування	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна, грн.	Сума, грн.
Зразки Pt/Fe/Au/Pt/Fe	шт.	21	117	2457

Транспортно-заготівельні витрати становлять 10 % від вартості матеріалів.

Повна сума витрат на матеріали ( $C_M$ ):  $C_M = 2457 \times 1,1 = 2702,7$  грн.

#### 4.2.4 Визначення вартості спеціального обладнання і приладів

Всі дослідження в науково-дослідній роботі виконувались на обладнанні, що наявне в лабораторіях КПІ ім. Ігоря Сікорського.

#### 4.2.5 Визначення витрат на службові відрядження

Окремі службові відрядження не планувались під час проведення науково-дослідної роботи.

#### 4.2.6 Визначення вартості робіт і послуг сторонніх організацій

Послуги сторонніх організацій не використовувались під час виконання науково-дослідної роботи. Всі дослідження передбачені даною роботою виконувались в лабораторіях КПІ ім. Ігоря Сікорського.

#### 4.2.7 Визначення інших прямих неврахованих витрат

Інші прямі невраховані витрати ( $C_{\text{інш}}$ ) становлять 10 % від врахованих.

$$C_{\text{інш}} = 0,1 \times (25135 + 5529,7 + 2702,7) = 3336,74 \text{ грн.}$$

#### 4.2.8 Визначення накладних витрат

Норматив відрахувань на накладні витрати ( $H_B$ ) для КПІ ім. Ігоря Сікорського встановлений в розмірі 16 % планової суми прямих витрат на виконання науково-дослідної роботи.

$$H_B = 0,16 \times (25135 + 5529,7 + 2702,7 + 3336,74) = 5872,66 \text{ грн.}$$

#### 4.2.9 Визначення планової кошторисної вартості науково-дослідної роботи

Планова кошторисна вартість науково-дослідної роботи визначається як сума витрат за окремими статтями вартості. Результати визначення вартості наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Планова кошторисна вартість науково-дослідної роботи

Назва калькуляційної статті	Позначення	Сума	
		грн.	%
1. Фонд заробітної плати виконавців теми	ФЗП	25135	59,03
2. Єдиний соціальний внесок	Вс	5529,7	12,99
3. Матеріали необхідні для виконання теми	См	2702,7	6,35
4. Спеціальне обладнання для наукових робіт	Соб	—	—
5. Роботи і послуги сторонніх організацій	Сстор	—	—
6. Витрати на службові відрядження	Свід	—	—
7. Інші прямі невраховані витрати	Сінш	3336,74	7,84
8. Накладні витрати	Нв	5872,66	13,79
Всього		42576,8	100

В таблиці 4.5 наведено аналіз сильних, слабких та нейтральних сторін проекту у порівнянні з конкурентами.

Таблиця 4.5 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			
		Даний проект	Конкурент 1 Seagate Technology	Конкурент 2 Western Digital	Конкурент 3 Toshiba
		Середовище магнітного запису інформації			
1	2	3	4	5	6
1	Собівартість плівкової композиції	Дешевший	Дорожчий	Дорожчий	Дорожчий
		S	W	W	W
2	Вартість експлуатації (споживання енергії)	Стандартна	Стандартна	Стандартна	Стандартна
		N	N	N	N
3	Вартість установки для запису інформації	Менша	Більша	Більша	Більша
		S	N	N	N
4	Намагніченість насичення	Стандартна	Стандартна	Стандартна	Стандартна
		N	N	N	N
5	Екологічність (обсяг відходів)	Витратні матеріали	Витратні матеріали	Витратні матеріали	Витратні матеріали
		W	W	W	W

\* W (слабка сторона), N (нейтральна сторона), S (сильна сторона)

Виходячи з характеристик наведених у табл. 4.5 можна зробити висновок, що головними техніко-економічними характеристиками, що формують конкурентоспроможність є собівартість плівкових композицій, а також вартість

установки для запису інформації.

В таблиці 4.6 представлені технології, які були використані для виготовлення та термічної обробки експериментальних зразків.

Таблиця 4.6 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Технологія магнетронного осадження	Технологія існує	Доступна
Технологія низькотемпературного відпалу у вакуумі	Технологія існує	Доступна

Як видно з табл. 4.6 запропонований проект можливо технологічно реалізувати, адже об'єкт даного дослідження (нанорозмірні плівкові композиції Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)) є лише малою частиною жорсткого диску. Є можливість спробувати записати інформацію на жорсткий диск, виготовлений на основі нанорозмірних плівкових композицій Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм)/Au(10 нм)/Pt(15,7 нм)/Fe(12 нм) після термічної обробки у вакуумі за допомогою технології перпендикулярного магнітного запису.

На даний момент на світовому ринку виробництвом жорстких дисків займаються всього три компанії: Seagate Technology, Western Digital та Toshiba. Аналітична компанія Trendfocus оприлюднила результати дослідження світового ринку жорстких дисків за першу половину 2019 року. Продажі жорстких дисків скоротилися в штуках, але з точки зору сумарної ємності зберігається зростання.

Близько 77 млн жорстких дисків відвантажено в першому кварталі 2019 року інформує Trendfocus. Зазначений результат виявився на 12 % гірше в квартальному зіставленні, а ось щодо аналогічного періоду 2018 року спад досяг глибших 18 %. За оцінками Trendfocus, у другому кварталі відвантажено близько 78 млн пристроїв, тоді як кварталом раніше – не більше 77 млн. Втім, порівняно з аналогічним періодом 2018 року спад зберігся і досяг 19 %. Даний спад попиту на жорсткі диски аналітики пов'язують зі стрімким розвитком та зниженням цін

на твердотільні накопичувачі, котрі забезпечують вищу швидкість запису та обробки інформації [39].

В таблиці 4.7 наведено попередню характеристику потенційного ринку стартап-проекту.

Таблиця 4.7 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	2	3
1	Кількість головних виробників, од	Виробництвом жорстких дисків зараз займаються всього три компанії: 1)Seagate Technology; 2)Western Digital; 3)Toshiba;
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од, 2019 рік	320 млн. од. (всі виробники)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	В 2020 році випуск комп'ютерних вінчестерів впаде до 305 млн. штук.
4	Наявність обмежень для входу	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандарт FIPS 140-2, ISO 40001, ISO 40002, ISO 13485
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку)	> 1

У табл. 4.8 наведено потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформований орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 4.8 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Швидкість обробки інформації на жорстких дисках	Компанії які виготовляють жорсткі диски: - Western digital technologies inc;	Стандарти, Технічні регламенти, Специфікації, Обсяги закупок,	Висока щільність запису, низька собівартість, висока швидкість обробки інформації
2	Збільшення щільності запису інформації на диск	- Seagate; - Toshiba; - SanDisk; - Transcend; - Verbatim.	Умови експлуатації	

Попередня оцінка ринку, проведена в таблиці 4.7, дозволяє зробити висновок, що входження на ринок з даним стартап-проектом цілком можливе, адже споживчий ринок вже повністю переорієнтувався на твердотільні накопичувачі. Виробники жорстких дисків давно зрозуміли цю тенденцію і також представляють свої прототипи нових запам'ятовуючих пристроїв. Однак вінчестери прекрасно працюють в таких галузях як центри обробки даних, мережових сховищах і системах відеоспостереження. Крім того, вони все ще дешевше SSD, тому застосовуються в комп'ютерах для зберігання великих обсягів даних або для здешевлення.

Впровадження даного проекту може сприяти покращенню ситуації на світовому ринку завдяки тому, що підвищення щільності запису інформації дає змогу підвищити швидкість запису і обробки даних, а також зменшити розміри носія.

Після визначення потенційних груп клієнтів проведено аналіз ринкового середовища (табл. 4.9 – 4.10): розроблені таблиці факторів загроз та можливостей реалізації проекту.

Таблиця 4.9 – Фактори загроз стартап-проекту

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Нестабільність політичної та економічної ситуації	Зменшення попиту та інвестування	Приймання участі у програмах (локальних та міжнародних) для залучення додаткових інвестицій.
		Зменшення кількості енергетичних ресурсів, ріст цін на матеріали	Перехід на інші види джерел енергії, залучення додаткових інвестицій.

Таблиця 4.10 – Фактори можливостей стартап-проекту

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	2	3	4
1	Зменшення собівартості товару	Зменшення витратних матеріалів	Збільшення обсягу виробництва
2	Зменшення розміру жорсткого диску	Принципово нові можливості виготовлення комп'ютерів	Збільшення обсягу продажу
3	Збільшення щільності запису інформації		

В таблиці 4.11 представлено SWOT- аналіз сильних та слабких сторін, а також можливостей та загроз стартап-проекту.

Таблиця 4.11 – SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- спрощення технології виготовлення жорсткого диску завдяки зменшенню температури формування матеріалу з феромагнітними властивостями;</li> <li>- підвищення швидкості запису/зчитування інформації за рахунок підвищеної щільності запису.</li> </ul>	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- необхідність проведення подальших досліджень та створення прототипу.</li> <li>- недотримання параметрів термічної обробки можуть призвести до руйнування магнітного матеріалу.</li> </ul>
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- здатність прийняти участь в наукових проектах (міжнародних та локальних), направлених на розробку носіїв магнітного запису з надвисокою щільністю;</li> <li>- можливість співпраці з компаніями, що виробляють жорсткі диски.</li> </ul>	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- технологічна складність реалізації термічної обробки з різною тривалістю в промислових масштабах;</li> <li>- зниження попиту на ринку жорстких дисків.</li> </ul>

Дослідження плівкових композицій на основі системи FePt досі триває, тому оцінити ринкову спроможність та створити маркетингову модель товару неможливо. В науково-дослідній роботі досліджено: вплив режиму термічної обробки (тривалості термічної обробки при заданій температурі) та введення додаткового шару Au на процеси структурно-фазових перетворень плівкових композицій. Так як дані плівкові композиції все ще досліджуються, вони є лише перспективними для використання в якості носія магнітного запису з надвисокою щільністю.

#### 4.3 Висновки до розділу 4

Проведено оцінку ринкових можливостей стартап-проекту «розробка плівкового матеріалу з високими магнітними властивостями, що може бути використаний в якості носія магнітного запису з надвисокою щільністю».



Впровадження даного проекту на світовий ринок є перспективним тому, що підвищення щільності запису інформації дає змогу підвищити швидкість запису і обробки даних, а також зменшити розміри носія. Для проведення повної оцінки ринкових спроможностей даного проекту необхідно проведення подальших досліджень.

## **5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Метою даного розділу є аналіз шкідливих та небезпечних факторів, за яких виникає небезпека ураження організму, умов, що можуть спричинити травмування в процесі дослідження розвитку дифузійних процесів і структурно-фазових перетворень при низькотемпературній термічній обробці плівкових композицій Pt/Fe/Au/Pt/Fe, а також розробка заходів спрямованих на усунення цих факторів.

Аналізуючи умови праці при виконанні магістерської дисертації потрібно розглянути наступні чинники:

- мікроклімат;
- склад повітря робочої зони;
- шум;
- вібрації;
- освітлення;
- виробниче випромінювання;
- електричний струм.

### **5.1 Правові та організаційні основи охорони праці**

Нормативним документом, що встановлює вимоги до охорони праці є Закон України «Про охорону праці».

Відповідно до ст. 15, на підприємстві з кількістю 50 і більше осіб що працюють роботодавець створює службу охорони праці відповідно до типового положення, що затверджується центральним органом виконавчої влади з питань нагляду за охороною праці [40].

Відповідно до ст. 15, в КПІ ім. Ігоря Сікорського, ректором Згуровським Михайлом Захаровичем, як роботодавцем, створено службу охорони праці, що підпорядковується безпосередньо йому. Начальник відділу охорони праці КПІ ім. Ігоря Сікорського Е.Г. Луцик. Відповідальним за охорону праці на

Інженерно-фізичному факультеті – П.І. Лобода., на кафедрі фізики металів – Є.В. Іващенко, в лабораторії № 506 – А.І. Мазур.

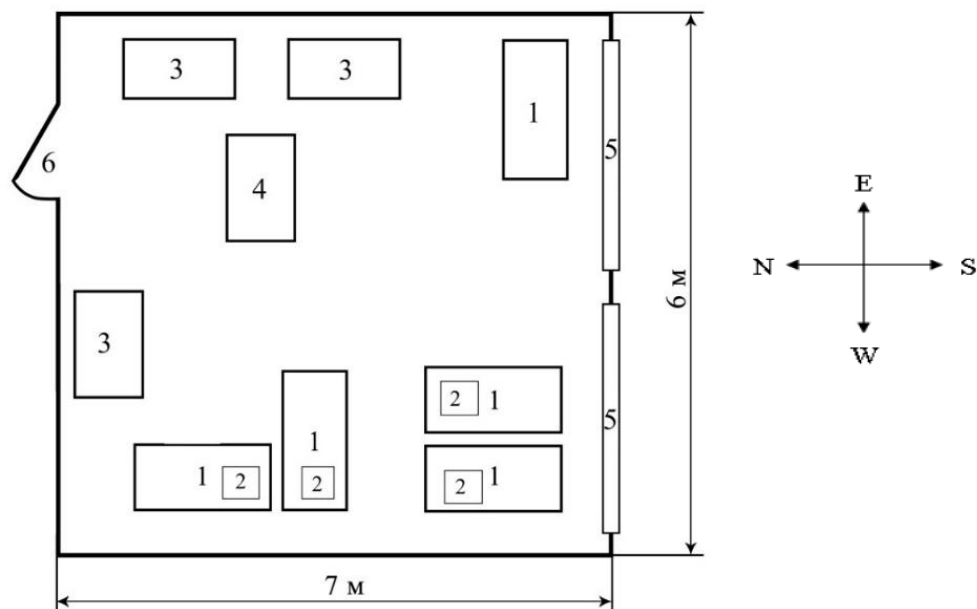
## 5.2 Аналіз наявності шкідливих та небезпечних виробничих факторів

### 5.2.1 Аналіз параметрів приміщення та мікроклімату

Науково-дослідна робота виконувалась на кафедрі фізики металів КПІ ім. Ігоря Сікорського, 5 поверху, корпусу № 9, в лабораторії № 506 (рис. 5.1)

Було знято заміри приміщення лабораторії:

- розміри лабораторії: ширина – 6 м, довжина – 7 м, висота – 2,7 м.



1 – робочий стіл; 2 – комп'ютер; 3 – шафа; 4 – установка ВУП-5М (робоче місце); 5 – вікно; 6 – двері

Рисунок 5.1 – Схема лабораторії в якій виконувалася науково-дослідницька робота

Лабораторія (рис. 5.1), в якій працює троє людей має площу  $48 \text{ м}^2$ , об'єм  $182 \text{ м}^3$ . Площа, яка приходить на одну людину –  $16 \text{ м}^2$ , об'єм  $\sim 60,6 \text{ м}^3$ . Таким чином площа та об'єм лабораторії, згідно з ДсанПіН 3.32-007-98, де на одну людину має приходитись не менше  $6 \text{ м}^2$  площі та  $20 \text{ м}^3$  об'єму, відповідають нормам [41].

Дуже важливу роль для нормальної працездатності людини відіграє чисте повітря, тому під час виконання науково-дослідної роботи також досліджено мікроклімат в приміщенні лабораторії.

Для забезпечення оптимального мікроклімату, оптимальні і допустимі значення температури, швидкість руху повітря та відносну вологість в робочій зоні в залежності від пори року та категорії важкості робіт встановлюють «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 [42].

Згідно ДСН 3.3.6.042-99 категорія важкості робіт, що виконувались в науково-дослідній роботі – легка І б. До даної категорії відносять легкі фізичні роботи до 150 Ккал/год, що супроводжуються певною фізичною напругою та виконуються в сидячому або стоячому положенні, і роботи пов’язані з ходінням.

Таблиця 5.1 – Мікроклімат лабораторії та ДСН 3.3.6.042-99

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість, %		Швидкість руху повітря, м/с		Опалення	Вентиляція
		Факт.	Оптим.	Факт.	Оптим.	Факт.	Оптим.		
Холодний	Легка І б	22	22 – 24	58	40 – 60	0,1	0,1	Водяне	Природна
Теплий		24	22 – 24	45	40 – 60	0,1	0,1	–	Природна

З наведених даних можна стверджувати, що мікроклімат лабораторії відповідає оптимальним вимогам санітарних норм, так як виміряні параметри входять у допустимі межі.

### 5.2.2 Повітря робочої зони

Вміст шкідливих речовин та пилу в повітрі приміщення визначає його чистоту. Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не має перевищувати гранично допустимих концентрацій, що використовуються при проектуванні виробничих будівель, обладнання, технологічних процесів, вентиляції. За ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ встановлені гранично допустимі концентрації

шкідливих речовин в повітрі робочої зони виробничих приміщень. Потрапляння до повітря робочої зони тих чи інших шкідливих речовин залежить від сировини, що використовується та технологічного процесу [43].

В даній роботі не передбачені процеси полірування, шліфування та травлення, а також щодня проводиться вологе прибирання приміщення. Термічна обробка плівкових зразків проводиться у вакуумі, тому шкідливі випаровування, виводяться за межі лабораторії по спеціально облаштованим шлангам. Виходячи з цього можна стверджувати, що вміст шкідливих речовин та пилу в приміщенні не перевищує допустимих значень.

### 5.2.3 Шум

Шум – це сукупність звуків різних частот та інтенсивностей, що виникають внаслідок ковалентного руху частинок у пружному середовищі. Науково-дослідна робота, а саме термообробка зразків, проводилась на установці ВУП-5М, що є джерелом певного шуму під час роботи.

Під впливом шуму відбувається зниження слухової чутливості. Чим гучніший шум, тим вище його інтенсивність і експозиція.

Найбільш ефективний засіб боротьби з шумом зниження його в джерелі створення: заміна шумних технологічних процесів або обладнання малошумними, звуковбирання та звукоізоляція, екранування, використання глушників шуму, заміна металевих частин на пластмасу, установка глушників, установка обладнання на прокладках, установка "антизвуку", оснащення шумних машин засобами дистанційного та автоматичного управління, застосування засобів індивідуального захисту. До індивідуальних засобів захисту від шуму відносять: протишумні навушники, вкладиші, шоломи, костюми, звукоізолюючі кабінки, акустичні екрани.

Регламент граничних величин шуму на робочих місцях встановлений в ДСН 3.3.6.037-99. У ньому закладено принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних видів [44].

#### 5.2.4 Вібрації

Вібрація – це механічні коливання пружних тіл або коливальні рухи механічних систем. Для людини вібрація є видом механічного впливу, що має негативні наслідки для організму.

Джерелами технологічної вібрації слугують стаціонарні електричні установки, вентилятори, насосні агрегати та ін. В науково-дослідній роботі джерелом вібрації виступала установка ВУП-5М.

Методом захисту від вібрації, з точки зору інженерії, є поглинання вібрації (віброгасіння). Машини з динамічним навантаженням (вентилятори, насосні агрегати), що є джерелом вібрації, встановлюють на окремі фундаменти. Джерела коливань ізолюються від опорних поверхонь гумовими, пружинними або комбінованими віброізоляторами.

Зниження вібрації в джерелах їх виникнення приводить до підвищення точності опрацювання деталей, оптимізація технологічного процесу, поліпшення балансування.

Для поліпшення організації праці при вібронебезпечних процесах потрібно дотримуватись певних правил: загальна кількість робочого часу в контакті з віброобладнанням не повинна перевищувати зміни; одноразова дія не повинна перевищувати для локальної – 20 хвилин, для загальної – 40 хвилин.

До лікувально-профілактичних заходів відносяться: гідропроцедури, масаж, заходи, що загально укріплюють організм. Вібрація має властивість кумуляції (накопичення в організмі).

Засоби захисту від вібрації регламентуються державним стандартом ДСН 3.3.6.039-99. «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації» [45].

#### 5.2.5 Електробезпека

Електричне обладнання, що використовується при виконанні науково-дослідної роботи, живиться напругою 220 В змінного струму частотою 50 Гц. Воно відноситься до I та II класів електротехнічних виробів за способом захисту

людини від враження електричним струмом у відповідності до ДНАОП 0.00-1.21-98 [46].

На тяжкість ураження організму електричним струмом впливають певні фактори: величина струму (1 мА), рід струму (струм змінний), частота струму (50 Гц), шлях струму в організмі, стан організму, тривалість дії струму, виробниче середовище.

При розробці захисних заходів, вважають небезпечним струм у 25 мА, при якому важко самотійно відірватись від провідника, а струм величиною 100 мА може призвести до смертельного наслідку.

Під час роботи ураження струмом може статися з наступних причин:

- випадкове доторкання до частин, які перебувають під напругою, через відсутність засобів захисту приладів або безвідповідальне відношення до безпеки персоналу;
- дотик до частин електроприладів, які випадково потрапили під напругу через ушкодження ізоляції чи іншого ушкодження;
- потрапляння під напругу під час ремонтування приладів через помилкове їх включення під час ремонту.

У лабораторії, де виконувалась науково-дослідна робота, наявне правильно виконане захисне заземлення корпусів, електроустаткування і приладів. Лабораторії № 506 відноситься до приміщення без підвищеної небезпеки ураження людини струмом, оскільки це сухе приміщення з температурою повітря (19 – 24) °С та струмонепровідною підлогою. Розташування робочих місць виключається можливість доторкання до корпусів, електроустаткування і приладів.

#### 5.2.6 Виробниче випромінювання

Нормування даних про виробничі випромінювання виконується відповідно до документу: Санітарні правила і норми «Гігієнічні вимоги до відеодисплейних терміналів і ПЕОМ і організації роботи» ДСанПіН 3.3.2-007-98 [41].

При роботі з комп'ютером, що входить в устаткування, виникає небезпека

впливу на організм робітника ультрафіолетового випромінювання, невикористаного рентгенівського випромінювання, електростатичного поля.

Норми потужності експозиційної дози рентгенівського випромінювання встановлені у СП 1960-79. Для побутової радіоелектронної апаратури воно не повинно перевищувати  $2,78 \cdot 10^{-12}$  мкР/с (100 мкР/год) в будь-якій точці на відстані 5 см від поверхні, що обернена до працівника [47]. Враховуючи, що більша частина роботи виконувалась на комп'ютері, час роботи за монітором скорочено до 4 годин за зміну, з технологічними перервами.

### **5.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці**

#### **5.3.1 Вимоги до організації робочого місця**

Вимоги до виробничих приміщень для експлуатації ПК, організації і обладнання робочих місць наведені в ДСанПіН 3.3.2.007-98 та НПАОП 0.00-1.28-10. Під час роботи з ПК конструкція робочого місця має забезпечити підтримання правильної робочої пози: ступні ніг – на підлозі або на підставці для ніг; стегна – в горизонтальній площині; передпліччя – вертикально; лікті – під кутом  $70^\circ - 90^\circ$  до вертикальної площини; зап'ястя зігнуті під кутом не більше  $15^\circ - 20^\circ$  відносно вертикальної площини.

Висота робочої поверхні столу для ПК має бути в межах 680 мм – 800 мм, а ширина – забезпечувати можливість виконання операцій в зоні досяжності моторного поля. Рекомендовані розміри столу: висота – 725 мм, ширина – 600 мм – 1400 мм, глибина – 800 мм – 1000 мм [41, 48].

Робочий стіл для ПК повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм, на рівні витягнутої ноги – не менше 650 мм [41].

Організація робочого місця в аудиторії № 506 повністю відповідає вказаним нормам.



### 5.3.2 Вентиляція

Згідно з ДБН В.2.5-67:2013, місцева вентиляція повинна забезпечувати вилучення забрудненого повітря із зон виділення шкідливих речовин. В інших випадках допускається використання загальнообмінної вентиляції. Рекомендовано використання загальнообмінної вентиляції у поєднанні з місцевою вентиляцією, котра розрахована на видалення з виробничого приміщення шкідливих речовин нелокалізованих місцевими витяжними пристроями [49].

В даній науково-дослідній роботі проводився низькотемпературний відпал у вакуумі, тому можна стверджувати що виділення шкідливих речовин не відбувалось. Усі гази, що відкачувались з під вакуумного ковпака за допомогою форвакуумного насосу одразу виводились за межі лабораторії по спеціально облаштованим шлангам.

### 5.3.3 Аналіз освітлення приміщення

Залежно від джерела світла розрізняють такі види виробничого освітлення: природне, прямі сонячні промені; штучне, електричні джерела світла, та суміщене, недостатнє природне освітлення доповнюється штучним.

Природне освітлення поділяється на: бокове (одно- або двостороннє), що здійснюється через світлові отвори в зовнішніх стінах; верхнє – через ліхтарі та отвори в стелях і перекриттях; комбіноване – поєднання верхнього та бокового освітлення.

В лабораторії реалізована схема суміщеного освітлення. Природне бокове освітлення в світлий час доби забезпечується наявністю вікон. Для забезпечення штучного освітлення, при нестачі природного, використовують люмінесцентні лампи ЛБ-40 в кількості 24 одиниць.

## 5.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

До небезпек, що можуть статися на виробництві, відносять: пожежі; вибухи (усередині обладнання, будівлях або навколишньому середовищі); викид

шкідливих речовин; розрив або руйнування обладнання; одночасне виникнення декількох з перелічених видів небезпеки. Для запобігання виникненню та ліквідації надзвичайних ситуацій на підприємстві має бути план локалізації та ліквідації надзвичайних ситуацій і аварій у відповідності до положення [40].

#### 5.4.1 Пожежна безпека

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 категорії приміщень та будівель підвідомчих підприємств та установ визначаються міністерствами та відомствами, а також технологами проектних організацій на стадії проектування.

В залежності від речовин та матеріалів, що знаходяться у приміщенні, небезпекою приміщення та будівлі за вибуховою та пожежною безпекою поділяються на категорії А, Б, В, Г і Д. В приміщенні категорії А наявні вибухопожежонебезпечні, горючі гази, легкозаймисті рідини з температурою спалаху не більше 28 °С, а також речовини та матеріали, здатні вибухати та горіти при взаємодії з водою, киснем повітря або один з одним у кількостях, що можуть утворювати вибухонебезпечні парогазоповітряні суміші, при спалахуванні яких розвивається надлишковий тиск вибуху в приміщенні, який перевищує 5 кПа. В приміщенні категорії Б присутні горючий пил чи волокна, легкозаймисті рідини з температурою спалаху більше 28 °С, горючі рідини у кількостях, що можуть утворювати вибухонебезпечні пилепоповітряні чи парогазоповітряні суміші, при спалахуванні яких розвивається надлишковий тиск вибуху в приміщенні, який перевищує 5 кПа. В приміщенні категорії В присутні горючі та важкогорючі рідини, тверді та важкогорючі речовини та матеріали (в тому числі пил та волокна), речовини та матеріали, здатні при взаємодії з водою, киснем повітря або один з одним лише горіти, за умови, що приміщення, в яких вони наявні, не відносяться до категорій А і Б. В приміщенні категорії Г наявні негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному чи розплавленому стані, процес обробки котрих супроводжується виділення променевого тепла, іскор та полум'я; горючі гази, рідини та тверді речовини, котрі спалюються чи утилізуються в якості палива. В приміщенні категорії Д

присутні негорючі речовини та матеріали в холодному стані) [50].

Виходячи з вищезазначеного лабораторія № 506, в якій проведено науково-дослідну роботу, відноситься до приміщення категорії Г. План евакуації поверху № 9 в разі виникнення пожежі наведено на рисунку 5.2.

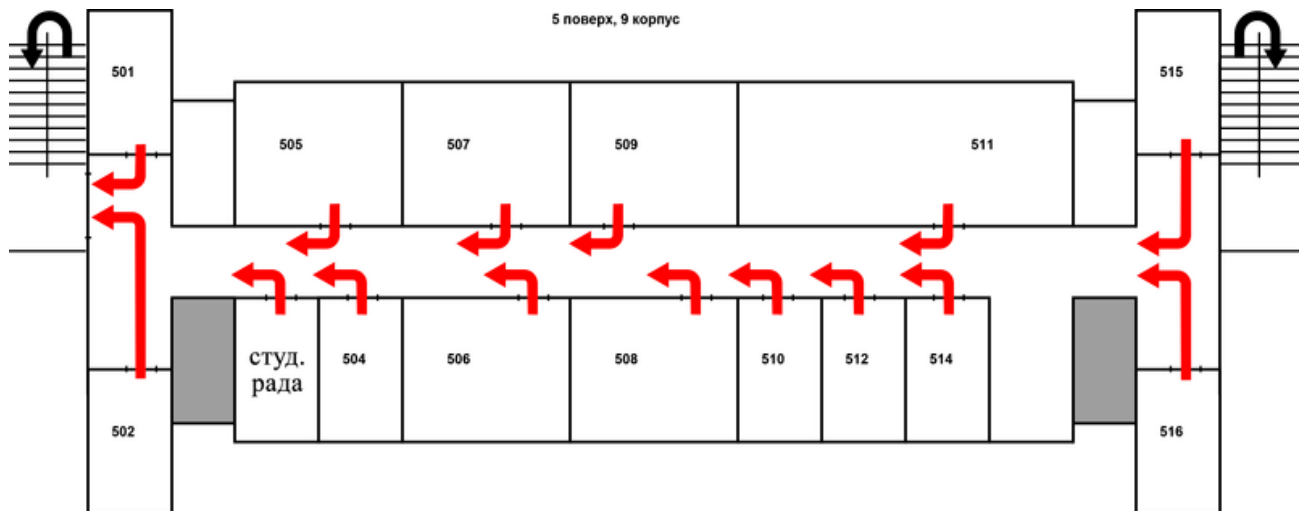


Рисунок 5.2 – План евакуації

Засобами виявлення загорання є встановлені на стелі автоматичні датчики-сигналізатори, а засобом оповіщення співробітників про пожежу служить внутрішній службовий зв'язок.

#### 5.4.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пробією електричної напруги на корпус вакуумної установки ВУП-5М необхідно відключити установку від мережі і довести до відома про це відповідальну особу за безпеку правці в лабораторії № 506.

У випадку ураження кого-небудь струмом, необхідно відключити установку від мережі, покласти потерпілого на рівну дерев'яну підлогу, підклавши під голову подушку, викликати швидку за телефоном 103 і, в разі необхідності, надати першу медичну допомогу.

У випадку загорання вакуумної установки необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

### **5.5 Висновки до розділу 5**

1. Проведено аналіз шкідливих та небезпечних факторів, за яких може виникнути небезпека ураження організму.

2. Мікроклімат, освітлення та організація робочого місця в лабораторії № 506-9 відповідають вимогам санітарних норм, а рівень шуму, вібрацій та виробничого випромінювання не перевищує допустимих меж.

## ВИСНОВКИ

1. Нанорозмірні плівкові композиції на основі Pt/Fe з впорядкованою фазою  $L1_0$ -FePt є перспективним матеріалом для використання в якості носія магнітного запису інформації з підвищеною щільністю завдяки високим значенням магнітокристалічної анізотропії та коерцитивної сили, що характерні даній фазі.

2. Введення додаткових проміжних шарів легуючих елементів може чинити істотний вплив на закономірності перебігу дифузійних процесів, формування структурно-фазових станів, процеси впорядкування, а отже – і на магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt.

3. Виявлено, що термічна обробка в температурному інтервалі 150 °C – 200 °C з варіюванням тривалості відпалу дозволяє проводити поетапне дослідження розвитку дифузійних процесів і процесів структурно-фазових перетворень в нанорозмірних плівкових системах Pt/Fe/Au/Pt/Fe через те, що при відпалах в даному температурному інтервалі спостерігається активація дифузійного перемішування між шарами за зернограничним механізмом.

4. Нерівномірність розподілу Fe в шарах Pt свідчить про те, що введення додаткового шару Au в плівкові композиції Pt/Fe обумовлює можливість керування розвитком дифузійних процесів – прискорення дифузії Fe в один з шарів Pt може дозволити формування мігнітно-градієнтного плівкового матеріалу на основі впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt – матеріалу з нерівномірним розподілом фазового складу, а отже і магнітних властивостей (зокрема коерцитивної сили) за товщиною без чітких границь поділу між наявними фазами.

5. Проведено оцінку ринкових можливостей стартап-проекту «розробка плівкового матеріалу з високими магнітними властивостями, що може бути використаний в якості носія магнітного запису з надвисокою щільністю». Впровадження проекту на світовий ринок є перспективним тому, що підвищення щільності запису інформації дає змогу підвищити швидкість запису і обробки даних, а також зменшити розміри носія.

6. Мікроклімат, освітлення та організація робочого місця в лабораторії № 506-9 відповідають вимогам санітарних норм, а рівень шуму, вібрацій та виробничого випромінювання не перевищує допустимих меж.

## CONCLUSIONS

1. Nanosized Pt/Fe based compositions with  $L1_0$ -FePt ordered phase is a promising material for use as a high-density magnetic recording media due to high magnetic crystal anisotropy and coercive force characteristics of this phase.

2. Introduction of additional intermediate layers of alloying elements can have a significant impact on the regularities of the diffusion processes, formation of structural-phase states, ordering processes, and therefore – on the magnetic properties of nanoscale FePt-based film compositions.

3. As a result of the work, it is found that heat treatment in the temperature range 150 °C-200 °C with variation of the annealing duration allows for a gradual study of the development of diffusion processes and processes of structural-phase transformations in nanoscale Pt/Fe/Au/Pt/Fe film systems due to the fact that during annealing in this temperature interval activation of diffusion mixing by the grain boundary mechanism is observed.

4. Non uniform distribution of Fe in the Pt layers indicates that the introduction of an additional Au layer into Pt/Fe stacks makes it possible to control the development of diffusion processes – accelerating the diffusion of Fe into one of the Pt layers may allow the formation of a magnetic gradient films based on the ordered  $L1_0$ -FePt phase – material with unequal distribution of the phase composition, and therefore the magnetic properties (in particular, the coercive force) in thickness without clear boundaries of separation between the available phases.

5. The market opportunities of the startup project “development of film material with high magnetic properties that can be used as a high-density magnetic recording medium” have been evaluated. The introduction of the project into the world market is promising because the increase in the density of recording information allows to increase the speed of recording and processing of data, as well as reduce the size of the media.

6. The microclimate, lighting and organization of the workplace in laboratory No. 506-9 meet the requirements of sanitary norms, and the level of noise, vibrations

and industrial radiation does not exceed the admissible limits.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Materials science aspects of FePt-based thin films formation / O.V. Shamis, I.A. Vladymyrskyi, Yu.M. Makogon, S.I. Sidorenko // *Usp. Fiz. Met.* – 2018. – 19. – pp. 337-363.
2. Jiao Y. Dependence of predicted areal density on common optimization strategies for heat-assisted magnetic recording / Y. Jiao, R.H. Victora // *IEEE Magn. Lett.* – 2017. – 8. – p. 7956162.
3. Weller D. Thermal effect limits in ultrahigh density magnetic recording / D. Weller, A. Moser // *IEEE Trans. Magn.* – 1999. – 35. – p. 4423.
4. Effects of Cr underlayer and Pt buffer layer on the interfacial structure and magnetic characteristics of sputtered FePt films / A.C. Sun, J.H. Hsu, H.L. Huang, P.C. Kuo // *J. Magn. Magn. Mat.* – 2006. – 304. – pp. 106-110.
5. Wang B. Re-evaluation of the impact of ternary additions of Ni and Cu on the  $A1$  to  $L1_0$  transformation in FePt films / B. Wang, K. Barmak // *J. Appl. Phys.* – 2011. – 109. – pp. 123916.
6. Tuning the Curie temperature of  $L1_0$  ordered FePt thin films through site-specific substitution of Rh / D. Xu, C.J. Sun, J.S. Chen, T.J. Zhou [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2014. – 116. – pp. 143902.
7. Wang B. The impact of deposition temperature on  $L1_0$  formation in FePt films / B. Wang, K. Barmak // *J. Appl. Phys.* – 2012. – 111. – pp. 07B718.
8. Вплив атмосфери термічної обробки на формування структури і фазового складу плівкових композицій FePt/Cu/FePt / А.Ю. Черниш, О.В. Фігурна, І.А. Владимирський, Ю.М. Макогон // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2016. – 5. – с. 78-83.
9. Promotion of [001]-oriented  $L1_0$ -FePt by rapid thermal annealing with light absorption layer / L.W. Wang, W.C. Shih, Y.C. Wu, C.H. Lai // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – 101.
10. Tuning magnetic anisotropy in (001) oriented  $L1_0$  ( $\text{Fe}_{1-x}\text{Cu}_x$ )<sub>55</sub>Pt<sub>45</sub> films / D. Gilbert, L.W. Wang, T.J. Klemmer, J.U. Thiele [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2013.

– 102. – p. 132406.

11.  $Ll_0$ -FePt films fabricated by wet-chemical route / X. Hong, W. Xiao, N. Bao, W. Li, O. Chichvarina, J. Ding // Thin Solid Films. – 2015. – 589. – pp. 649-654.

12. Improved perpendicular magnetic properties of pulsed-dc-sputtered FePt thin films / C.Y. Shen, P.Y. Yeh, F.T. Yuan, H.W. Chang [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2018. – 350. – pp. 795-800

13. Magnetic anisotropy phase-graded  $Al/Ll_0$ -FePt films on amorphous glass substrates / G. Barucca, Th. Speliotis, G. Giannopoulos, D. Niarchos [et al.] // Materials & Design. – 2017. – 123. – pp. 147-153.

14. Magnetic anisotropy of  $Ll_0$ -FePt film on (001)  $LaAlO_3$  / A.M. Zhanga, W.H. Zhu, L. Zheng, L. Huang, J.L. Gao, S.L. Tang, X.S. Wu // J. Magn. Magn. Mat. – 2013. – 332. – pp. 89-92.

15. Investigation of microstructure and magnetic properties of FePt films grown on different substrates / K.F. Dong, F. Jin, W.Q. Mo, J.L. Song, W.M. Cheng // Mater. Lett. – 2016. – 164. – pp. 97-103.

16. Promotion of  $Ll_0$  ordering in Pt-rich nonepitaxially grown FePt films / Y.L. Li, T.F. Feng, Q. Chen, A.P. Huang, Z.Y. Chena // Mater. Lett. – 2011. – 65. – pp. 2589-2591.

17. Effect of FePt/Mo interface on ordering transformation / S.N. Hsiao, S.K. Chen, F.T. Yuan, H.W. Huang, Y.D. Yao, H.Y. Lee // J. Magn. Magn. Mat. – 2007. – 310. – pp. e775-e776.

18. Grain boundary diffusion induced reaction layer formation in Fe/Pt thin films / G.L. Katona, I.A. Vladymyrskyi, I.M. Makogon [et al.] // Appl. Phys. A. – 2014. – 115. – pp 203-211.

19. Microstructure and magnetic properties of nanocomposite FePt/MgO and FePt/Ag films / S.C. Chen, P.C. Kuo, A.C. Sun, C.Y. Chou, Y.H. Fang, T.H. Wu // J. Magn. Magn. Mat. – 2006. – 304. – pp. e47-e49.

20. Structural and magnetic properties of annealed FePt/Ag/FePt thin films / O.P. Pavlova, T.I. Verbitska, I.A. Vladymyrskyi [et al.] // Appl. Surf. Science. – 2013.

– 266. – pp. 100-104.

21. Tsai J.L. Magnetic properties and microstructure of FePtC films with TiOC/MoC combined intermediate layer / J.L. Tsai, K.C. Hu, J.L. Tzeng // *Surf. Coat. Technol.* – 2016. – 303. – pp. 141-147.

22. Enhanced coercivity in C/Fe/Pt thick-film magnets / Z. Wang, Q. Wu, Y. Yang, P. Zhang, H. Ge // *J. Magn. Magn. Mat.* – 2017. – 441. – pp. 562-565.

23. Effect of TiN-ZrO<sub>2</sub> intermediate layer on the microstructure and magnetic properties of FePt and FePt-SiO<sub>2</sub>-C thin films / K.F. Dong, W.Q. Mo, F. Jin, J.L. Song // *J. Magn. Magn. Mat.* – 2017. – 432. – pp. 323-329.

24. Владимирський І.А. Низькотемпературне дифузійне фазоутворення в плівкових композиціях Pt/Fe і Pt/Au/Fe / І.А. Владимирський // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2016. – 1. – с. 66-76.

25. Skriver H.L. Surface energy and work function of elemental metals / H.L. Skriver // *Phys. Rev. B.* – 1992. – 46. – pp. 7157-7168.

26. Ogata Y. Effect of third element for FePt ordered alloy thin films with perpendicular magnetic anisotropy fabricated from Fe/Pt/X trilayer / Y. Ogata, Y. Imai, S. Nakagawa // *Physics Procedia.* – 2011. – 16. – pp. 36-41.

27. Very high coercivities of top-layer diffusion Au/FePt thin films / F.T. Yuan, S.K. Chen, W.M. Liao, C.W. Hsu [et al.] // *J. Magn. Magn. Mat.* – 2006. – 304. – pp. e109-e111.

28. Magnetic properties and microstructure study of high coercivity Au/FePt/Au trilayer thin films / S.K. Chen, F.T. Yuan, W.M. Liao, C.W. Hsu, L. Horng // *J. Magn. Magn. Mat.* – 2006. – 303. – pp. e251-e254.

29. Техника магнетронного распыления тонких пленок. Газофазное осаждение тонких пленок. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/6338835/> Дата доступа: 10.10.2019. – Назва з екрану.

30. Металлы и полупроводники: технологии и процессы – Режим доступа: <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/p/PANIN/learning/Metals/Tab1/Lecture12.pdf> – Дата доступа 10.10.2019. – Назва з екрану.

31. Рентгеноструктурный анализ, методы исследования структуры

вещества по распределению в пространстве и интенсивностям рассеянного на анализируемом объекте рентгеновского излучения – Режим доступа: [http://www.ibmcs.msk.ru/content/Education/w-o\\_pass/ММoB/11.pdf](http://www.ibmcs.msk.ru/content/Education/w-o_pass/ММoB/11.pdf) – Дата доступа: 10.10.2019. – Назва з екрану.

32. Устройство рентгеновского дифрактометра. Фокусировка по Бреггу – Брентано – Режим доступа: <https://studopedia.info/6-46736.html> – Дата доступа: 10.10.2019. – Назва з екрану.

33. Oechsner H. Encyclopedia of Analytical Science / H. Oechsner. // Academic Press Limited. – 1995. – p. 5014.

34. Батурин В.А. Масс-спектрометр вторичных нейтралей на базе ионного имплантера / В.А. Батурин, С.А. Еремин, С.А. Пустовойтов // Вопросы атомной науки и техники. – 2006. – 5. – с. 222-224.

35. Поклонський Н.А. Чотирьохзондовий метод вимірювання електричного опору напівпровідникових матеріалів: Учебно-методическе посібник по спецпрактикуму “Фізика напівпровідникових матеріалів і приборів” для студентів фізического факультета / Н.А. Поклонський, С.С. Белявський, С.А. Вирко, Т.М. Лапчук // Мінськ: Белгосуніверситет. – 1998. – 46 с.

36. Холявко В.В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів [текст]: навчальний посібник для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / В.В. Холявко, І.А. Владимирський, О.О. Жабинська. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. – с 156.

37. Времяпролетная Вторичная Ионная Масс Спектрометрия (ВИМС) – Режим доступа: <http://www.issp.ac.ru/lsts/ru/methods/sims> – Дата доступа: 10.10.2019. – Назва з екрану.

38. Phase transformations in Pt/Fe bilayers during post annealing probed by resistometry / O.V. Shamis, N.Y. Safonova, M.M. Voron, A.P. Burmak [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2019. – 31. – p. 285401.

39. Спад мирового рынка жестких дисков достиг 19%. – Режим доступа: [https://ko.com.ua/spad\\_mirovogo\\_rynka\\_zhestkih\\_diskov\\_dostig\\_19\\_129433](https://ko.com.ua/spad_mirovogo_rynka_zhestkih_diskov_dostig_19_129433) – Дата

доступу: 25.11.2019. – Назва з екрану.

40. Желібо Є.П. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів освіти України I-IV рівнів акредитації. / Є.П. Желібо, Н.М. Заверуха, В.В. Зацарний // Київ: «Каравела». – 2001. – 320 с.

41. ДСанПіН 3.3.2.007-98 – Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) електронно-обчислювальних машин.

42. ДСН 3.3.6.042-99. – Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

43. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. – Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

44. ДСН 3.3.6.037-99 – Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

45. ДСН 3.3.6.039-99. – Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.

46. ДНАОП 0.00-1.21-98. – Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

47. СП1960-79 – Санитарные правила работы с источниками неиспользуемого рентгеновского излучения.

48. НПАОП 0.00-1.28-10 – Правила охорони праці під час експлуатації ЕОМ.

49. ДБН В.2.5-67:2013. – Опалення, вентиляція та кондиціонування.

50. НАПБ Б.03.002-2007. – Визначення категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.